

JAQUELINE DORNELES DE SOUZA

**MODELO ESPAÇO-TEMPORAL EM SIG PARA ANÁLISE DE
QUALIDADE DA ÁGUA EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA**

**Dissertação apresentada como requisito
parcial à obtenção do grau de Mestre em
Ciências Geodésicas, Curso de Pós-
Graduação em Ciências Geodésicas,
Setor de Geociências, Universidade
Federal do Paraná.**

**Orientadora: Prof^ª. Dr.^a Cláudia Robbi
Sluter**

**Co-orientadora: Prof^ª. Dr.^a Maria
Cristina Borba Braga**

**CURITIBA
2004**

“Aos meus pais, os melhores professores
que a vida me deu”.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado forças e ânimo para concluir este trabalho.

Agradeço ainda:

A minha orientadora Prof^a Claudia Robbi Slutter, por ter acreditado em mim, pelos conhecimentos repassados e pela compreensão demonstrada durante a realização do trabalho. Por ter me recebido em sua casa para me ajudar nas conclusões finais, o que sei, vai muito além da sua obrigação como orientadora.

A minha co-orientadora Prof^a Maria Cristina Braga, pelos conhecimentos sobre qualidade da água transmitidos, ajuda na preparação dos dados e correção do trabalho.

A SUDERHSA, IPPUC e Departamento de Hidráulica e Saneamento da UFPR pela disponibilização de dados.

A Gisele Cavichiollo, por todas as vezes que me recebeu, sempre com boa vontade, para me repassar dados e me ajudar a aprender o modelo QUAL2E.

Ao meu colega e chefe, Emilio Trevisan, pelo apoio, incentivo, e por permitir que eu me ausentasse da SUDERHSA para concluir este trabalho, sem o que teria sido impossível chegar até aqui, obrigada!

Aos meus colegas de equipe pela compreensão pela minha ausência, e especialmente a Marta Burko e ao Josemar Santos Lima pela ajuda prestada na realização de minhas atividades profissionais.

Aos amigos, Sonia Burmester do Amaral e Antonio Marcos Ferreira, pelo apoio, colaboração e compreensão durante o período em que trabalhamos juntos, e pelo incentivo e interesse pelo trabalho.

Ao meu colega de trabalho, Jurandir Boz Filho, por ter me acompanhado na realização das visitas a campo.

Aos meus colegas do curso, especialmente a Juliana Moulin, pela amizade e muitas horas de estudo compartilhadas.

A minha família, pelo carinho e incentivo durante esse período.

Ao meu marido e companheiro, Mauricio, pelo amor, carinho, amizade, pela colaboração, compreensão e paciência em todos os momentos, por ter acreditado em mim e ser meu maior incentivador, MUITO OBRIGADA!

E a todos os amigos que se preocuparam e torceram por mim durante este período.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS: REPRESENTAÇÃO DE DADOS ESPACIAIS E TEMPORAIS	10
2.1. SEMÂNTICA DE DADOS ESPAÇO-TEMPORAIS	10
2.2. REPRESENTAÇÃO ESPACIAL	14
2.3. REPRESENTAÇÃO DE DADOS ESPAÇO-TEMPORAIS EM SIG	18
2.3.1 <i>Modelo “retratos seqüenciais”</i>	<i>19</i>
2.3.2 <i>Modelo “estado inicial com emendas”</i>	<i>20</i>
2.3.3 <i>Modelo “composição espaço-temporal”</i>	<i>21</i>
2.3.4 <i>Modelo “composição espaço temporal” baseado na abordagem campo</i>	<i>22</i>
2.3.5 <i>Modelo TRIAD.....</i>	<i>23</i>
2.3.6 <i>Modelo ESTDM.....</i>	<i>24</i>
2.3.7 <i>Modelo Oogeomorph.....</i>	<i>25</i>
2.3.8 <i>Modelo “Objeto Espaço-temporal”</i>	<i>26</i>
2.3.9 <i>Modelo SAIF.....</i>	<i>27</i>
2.3.10 <i>Modelo proposto por YUAN.....</i>	<i>28</i>
2.4. REQUISITOS DE UMA APLICAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL EM SIG	33
2.5. PROJETO DE BANCO DE DADOS.....	36
2.5.1 <i>Modelo Entidade-Relacionamento</i>	<i>38</i>
3. RECURSOS HÍDRICOS E QUALIDADE DA ÁGUA.....	40
3.1. USOS DA ÁGUA.....	42
3.2. QUALIDADE DA ÁGUA	45
3.2.1 <i>Fontes de Poluição da Água.....</i>	<i>47</i>
3.2.2 <i>Método para o Cálculo de Poluição Difusa (Simple Method).....</i>	<i>50</i>
3.2.3 <i>Parâmetros da Qualidade da Água e Padrões Ambientais</i>	<i>51</i>
3.3. O MODELO QUAL2E DE QUALIDADE DA ÁGUA.....	57

3.3.1	<i>Modelagem da Qualidade da Água Utilizando o QUAL2E</i>	62
3.4.	INVENTÁRIO DE RECURSOS HÍDRICOS.....	65
3.5.	LEGISLAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL.....	66
4.	METODOLOGIA	68
5.	MODELO DE DADOS ESPAÇO-TEMPORAL PROPOSTO	81
5.1.	DESCRIÇÃO DA BACIA DO BARIGÜI	81
5.2.	ADAPTAÇÃO DO MODELO ESTDM	89
5.3.	MODELO E-R.....	90
5.3.1	<i>Diagrama Geral</i>	<i>90</i>
5.3.2	<i>Diagrama do Sistema de Rios.....</i>	<i>91</i>
5.3.3	<i>Diagrama de Eventos</i>	<i>94</i>
5.3.4	<i>Diagrama das Fontes Poluidoras Pontuais.....</i>	<i>97</i>
5.3.5	<i>Diagramas das Fontes Poluidoras Difusas</i>	<i>100</i>
5.3.6	<i>Diagrama das Captações de Água</i>	<i>108</i>
5.3.7	<i>Diagrama dos Fenômenos Climatológicos.....</i>	<i>109</i>
5.3.8	<i>Diagrama das Estações de Monitoramento.....</i>	<i>110</i>
5.3.9	<i>Diagrama Dados Específicos do Modelo QUAL2E</i>	<i>112</i>
6.	IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO ESPAÇO-TEMPORAL.....	116
6.1.	DADOS UTILIZADOS.....	116
6.1.1	<i>Projeto Barigüi.....</i>	<i>116</i>
6.1.2	<i>Cadastro de Usos e Usuários de Recursos Hídricos da Bacia do Alto Iguaçu</i>	<i>117</i>
6.1.3	<i>Sistema de Informações Geográficas para Gestão de Recursos Hídricos.....</i>	<i>118</i>
6.2.	PREPARAÇÃO DOS DADOS	118
6.2.1	<i>Bacia e Micro-Bacias</i>	<i>119</i>
6.2.2	<i>Rios e Trechos de Rio</i>	<i>120</i>
6.2.3	<i>Indústrias.....</i>	<i>124</i>
6.2.4	<i>Estações de Tratamento de Esgoto.....</i>	<i>127</i>

6.2.5	<i>Estabelecimentos Comerciais e Prestadores de Serviços</i>	129
6.2.6	<i>Aterros Sanitários</i>	130
6.2.7	<i>Lançamento de Esgoto Doméstico In Natura</i>	130
6.2.8	<i>Cargas Poluidoras Pontuais</i>	131
6.2.9	<i>População</i>	132
6.2.10	<i>Captações de Água</i>	136
6.3.	IMPLEMENTAÇÃO NO ARCVIEW	137
7.	RESULTADOS	139
8.	CONCLUSÕES	168
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	174

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – LOCALIZAÇÃO DA BACIA DO RIO BARIGÜI.....	8
FIGURA 2.1 – O PROCESSO DE MODELAGEM DO DOMÍNIO FONTE PARA O DOMÍNIO ALVO	14
FIGURA 2.2 – REPRESENTAÇÃO VETORIAL DE ENTIDADES GEOGRÁFICAS	16
FIGURA 2.3 – REPRESENTAÇÃO MATRICIAL DAS ENTIDADES GEOGRÁFICAS.....	17
FIGURA 2.4– MODELO “RETRATOS SEQUENCIAIS”	20
FIGURA 2.5 - ABORDAGEM “VETOR “EMENDA”	21
FIGURA 2.6 – MODELO “COMPOSIÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL”	22
FIGURA 2.7 – “COMPOSIÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL” (MODELO CAMPO)	23
FIGURA 2.8 – MODELO ESTDM.....	25
FIGURA 2.9 – ESTRUTURA DE UM OBJETO ESPAÇO-TEMPORAL NO SAIF	28
FIGURA 2.10- ESTRUTURA HIERÁRQUICA DE EVENTOS, PROCESSOS E ESTADOS	30
FIGURA 3.1 – FONTES DE POLUIÇÃO DOS RIOS.....	47
FIGURA 3.2 – REPRESENTAÇÃO DO RIO NO MODELO QUAL2E.....	60
FIGURA 3.3 - DISCRETIZAÇÃO DO RIO NO MODELO QUAL2E.....	61

FIGURA 4.1– ROTEIRO METODOLÓGICO.....	69
FIGURA 4.2–DIVISÃO DO RIO BARIGÜI EM TRECHOS E SUB-BACIAS.....	71
FIGURA 4.3– NOTAÇÃO DO MODELO E-R.....	76
FIGURA 5.1– FOTOS DA NASCENTE DO RIO BARIGÜI.....	81
FIGURA 5.2 – PRINCIPAIS AFLUENTES DO RIO BARIGÜI.....	82
FIGURA 5.3 – USO E OCUPAÇÃO DO SOLO DA BACIA DO RIO BARIGÜI.....	83
FIGURA 5.4 – ESTABELECIMENTO INDUSTRIAIS, COMERCIAIS E PRESTADORES DE SERVIÇOS.....	85
FIGURA 5.5- DENSIDADE POPULACIONAL.....	86
FIGURA 5.6 FONTES DE POLUIÇÃO DIVERSAS	87
FIGURA 5.7– CAPTAÇÕES DE ÁGUA NA BACIA DO RIO BARIGÜI	88
FIGURA 5.8 – VISÃO GERAL DO MODELO ESPAÇO-TEMPORAL PROPOSTO.....	92
FIGURA 5.9 – DIAGRAMA DO SISTEMA DE RIOS	95
FIGURA 5.10 – DIAGRAMA DE EVENTOS.....	98
FIGURA 5.11 - DIAGRAMA DAS FONTES POLUIDORAS PONTUAIS	101
FIGURA 5.12 - DIAGRAMA DAS CARGAS POLUIDORAS DIFUSAS PROVENIENTES DA POPULAÇÃO	105
FIGURA 5.13 – DIAGRAMA DAS CARGAS POLUENTES DIFUSAS GERADAS PELO ESCOAMENTO SUPERFICIAL.....	107
FIGURA 5.14 – DIAGRAMA DAS CAPTAÇÕES	108
FIGURA 5.15 – DIAGRAMA DOS FENÔMENOS CLIMATOLÓGICOS.....	109
FIGURA 5.16 – DIAGRAMA DAS ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO.....	111
FIGURA 5.17 - DIAGRAMA DOS DADOS ESPECÍFICOS DO QUAL2E.....	115
FIGURA 6.1– MICRO BACIAS AJUSTADAS.....	120
FIGURA 6.2– CORREÇÃO DAS NASCENTES DO BARIGÜI NA BASE DA SUDERHSA.....	121
FIGURA 6.3 – TRECHOS DO RIO BARIGÜI E AFLUENTES.....	123
FIGURA 6.4 – AJUSTE DAS COORDENADAS DAS INDÚSTRIAS	124
FIGURA 6.5 – LOCALIZAÇÃO DE INDÚSTRIAS PELO ENDEREÇO.....	125

FIGURA 6.6 – IDENTIFICAÇÃO DE INDÚSTRIA LOCALIZADA FORA DA BACIA DO BARIGÜI	126
FIGURA 6.7 – LOCALIZAÇÃO DO RALF VILA RICA	128
FIGURA 6.8 – SOBREPOSIÇÃO DE TEMAS NO ARCVIEW PARA O CÁLCULO DA POPULAÇÃO POR MICRO-BACIAS A PARTIR DOS SETORES CENSITÁRIOS	133
FIGURA 6.9 – SOBREPOSIÇÃO DE TEMAS NO ARCVIEW PARA O CÁLCULO DA POPULAÇÃO NÃO ATENDIDA POR ESGOTAMENTO SANITÁRIO POR MICRO-BACIA	135
FIGURA 7.1 – EXEMPLO DA FUNÇÃO DE ATUALIZAÇÃO NO MODELO PROPOSTO.....	139
FIGURA 7.2 – EXEMPLO DE ENTIDADE ELIMINADA.....	140
FIGURA 7.3 – EXEMPLO DE UMA CONSULTA BASEADA EM ENTIDADE.....	141
FIGURA 7.4 – EXEMPLO DA EVOLUÇÃO DE UMA ENTIDADE	142
FIGURA 7.5 - EXEMPLO DE UMA CONSULTA BASEADA NO TEMPO	143
FIGURA 7.6 SITUAÇÃO EXISTENTE NA BACIA DO RIO BARIGÜI EM 2004.....	145
FIGURA 7.7 – CONSULTA DE EVENTOS.....	146
FIGURA 7.8 - CONSULTA DO EVENTO OCORRIDO EM UMA DATA ESPECÍFICA.....	147
FIGURA 7.9 – AVALIAÇÃO DO IMPACTO CAUSADO POR UMA FONTE POLUIDORA	148
FIGURA 7.10 – EXEMPLO DE RESULTADO DA SIMULAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA PREJUDICADO PELA LIMITAÇÃO DO MODELO QUAL2E PARA O PARÂMETRO DBO5	149
FIGURA 7.11 – COMPARAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA E AGENTES ENVOLVIDOS ENTRE 1996 E 2005	151
FIGURA 7.12 – CONSULTA DOS VALORES DE DBO5	152
FIGURA 7.13 – SIMULAÇÃO DE REALIDADES ALTERNATIVAS PARA O ANO DE 2010.....	154
FIGURA 7.14- MAPA DO EVENTO 1.....	155
FIGURA 7.15– MAPA DO EVENTO 2	156
FIGURA 7.16 - MAPA DO EVENTO 3.....	157
FIGURA 7.17- MAPA DO EVENTO 4.....	158
FIGURA 7.18- MAPA DO EVENTO 5.....	159
FIGURA 7.19- MAPA DO EVENTO 6.....	160

FIGURA 7.20- MAPA DO EVENTO 7.....	161
FIGURA 7.21- MAPA DO EVENTO 8.....	162
FIGURA 7.22- MAPA DO EVENTO 9.....	163
FIGURA 7.23- MAPA DO EVENTO 10.....	164
FIGURA 7.24- MAPA DO EVENTO 11.....	165
FIGURA 7.25- MAPA DO EVENTO 12.....	166
FIGURA 7.26- MAPA DO EVENTO 13.....	167

LISTA DE QUADROS

QUADRO 2.1- COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS DE DADOS ESPAÇO-TEMPORAIS PARA SIG..	31
QUADRO 3.1 – USOS MÚLTIPLOS DA ÁGUA POR CONTINENTE (km ³) (1995).....	43
QUADRO 3.2 – USOS DA ÁGUA.....	44
QUADRO 3.3– PRINCIPAIS POLUENTES POR FONTES DE POLUIÇÃO.....	49
QUADRO 4.1– EVENTOS	79
QUADRO 6.1 – TRECHOS DO BARIGÜI E AFLUENTES	122

LISTA DE SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Água

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CIC – Cidade Industrial de Curitiba

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

EPA-USA – Environmental Protection Agency dos Estados Unidos da América

ESTDM – Event-based Spatio-Temporal Data Model

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

GPS – Global Position System

IAP – Instituto Ambiental do Paraná

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPPUC – Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba

RALF - Reatores Anaeróbicos de Leito Fluidizado

RMC – Região Metropolitana de Curitiba

SANEPAR – companhia de Saneamento do Paraná

SGDB – Sistema Gerenciador de Banco de Dados

SIG – Sistema de Informações Geográficas

SUDERHSA – Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e
Saneamento Ambiental

RESUMO

Com este trabalho teve-se como objetivo o desenvolvimento de um modelo de dados espaço-temporal em SIG para análise da qualidade da água em uma bacia hidrográfica. Para o desenvolvimento do trabalho foi usada a metodologia de projeto de banco de dados da análise de sistemas e as técnicas do Modelo Entidade-Relacionamento. Para representar a evolução da qualidade da água no espaço e no tempo foi proposta uma adaptação do modelo “Dados Espaço-temporais baseado em Eventos – ESTDM”. Este modelo é baseado em eventos, e utiliza o tempo como base para organizar os dados espaciais, permitindo registrar o momento e o local das mudanças ocorridas. Sua versão original utiliza um modelo de representação de dados espaciais baseado em *campo* e trata o tempo de maneira ordenada. O modelo proposto por este trabalho, utiliza o modelo de representação dados espaciais baseado em *objeto* e permite a representação de eventos passados, presentes e futuros. Com o objetivo de testar sua eficiência, o modelo espaço-temporal proposto foi implementado no SIG ArcView 3.2 para a Bacia do Rio Barigüi, localizada na região Metropolitana de Curitiba, estado do Paraná, Brasil. Foi utilizado um modelo matemático de qualidade da água, QUAL2E para simular a influência das fontes poluidoras na qualidade da água na bacia hidrográfica. Através do modelo de dados proposto é possível armazenar o resultado de várias simulações para uma bacia hidrográfica, ligando cada simulação a um evento específico e identificando qual o cenário válido naquele momento. Dessa forma é possível identificar as alterações ocorridas na qualidade da água ao longo do tempo e relacioná-las aos eventos que as causaram e as fontes geradoras da poluição. O modelo suporta a existência de realidades alternativas, permitindo a simulação de cenários passados e futuros e a comparação entre eles. A partir do modelo implementado para a bacia do Barigüi foi possível identificar quais os elementos críticos relacionados com o parâmetro simulado, que foi a DBO₅. Com este trabalho pode-se constatar que o uso de um Sistema de Informações Geográficas para o conhecimento e avaliação dos impactos causados pelas atividades humanas na qualidade da água em uma bacia hidrográfica ao longo do tempo, é uma ferramenta útil para o gerenciamento dos recursos hídricos.

Palavras-Chave: Modelo espaço-temporal; Sistema de Informações Geográficas; Qualidade da água.

ABSTRACT

The aim of this work was the development of a spatial-temporal data model for GIS to analyse the quality of water in a watershed. It was applied the methodology of database project and system analysis, and the techniques of Entity-Relationship Model. To represent the evolution of the quality of the water in space and time it was proposed an adaptation of the *Event-based Spatio-Temporal Data Model – ESTDM*. The ESTDM is an event based model and utilizes time to organize spatial data, allowing to register when and where changes happened. In its original version it applies a *field-based* representation data model and consider time as ordered. The proposed model utilizes an object-based representation data model and considers time as branched, supporting the existence of past, actual and future events. In order to show its efficiency the proposed model was implemented in ArcView 3.2 by ESRI, for the Barigüi River Watershed, located at the metropolitan region of Curitiba City. To simulate the influence of the pollution sources at Barigüi river watershed it was used the mathematic model of water quality, QUAL2E. With the spatial-temporal model proposed it is possible to record the results of several simulations for the watershed, linking each simulation to a specific event and identifying which was the situation of the watershed at that time. That way, it is possible to identify the changes in the quality of the water through space and time and relate it to the events and pollution sources that have caused it. The model supports the existence of alternative realities, allowing the simulation of past, actual and future scenes and the comparison between them. By the analysis made for the Barigüi river watershed it was possible to identify which are the critical elements at that basin, for the simulated parameter, that was the DBO₅. This work has shown that the use of a Geographic Information System to know and analyse the impact of human activities in the quality of the water in a basin through space and time it is a helpful tool for the management of the water.

Key-Words: Spatio-temporal data model, Geographic Information System, Quality of water.

1. INTRODUÇÃO

O meio ambiente é um sistema complexo e dinâmico, onde os recursos naturais, que são a energia, os minerais, o ar, a água, o solo, as plantas e os animais, sofrem os efeitos das atividades sócio-econômicas desenvolvidas pelo ser humano. A fim de melhorar a qualidade e a quantidade de vida, a curto e longo prazo, deve-se preservar os recursos naturais, evitando-se seu uso inadequado, através do planejamento das atividades humanas. Para isso torna-se necessário conhecer e entender a dinâmica dos processos naturais e os efeitos das atividades antrópicas sobre os mesmos (ANEEL & ANA, 2001). A disponibilidade dos recursos naturais varia espacial e temporalmente. As propriedades da superfície terrestre tais como relevo, profundidade de um lago ou tipo de solo variam de um local para outro. Outras características como o uso e ocupação do solo, a existência de uma área urbana ou agrícola, a quantidade de árvores em uma floresta ou casas em uma rua, e a delimitação de unidades administrativas, se alteram em função das atividades humanas e variam no tempo (BURROUGH, 1998). Portanto, decisões futuras, tais como planejamento de novas rodovias e cidades, formulação de estratégias agrícolas e locais de mineração, dentre outras, devem se basear em informações espaço-temporais apropriadamente coletadas, gerenciadas e analisadas (WORBOYS, 1995).

Uma das grandes discussões da sociedade moderna tem sido a água como recurso natural, porém escasso. A água é um elemento necessário para quase todas as atividades humanas, e seus usos múltiplos pelo homem, através dos séculos, produziu um enorme conjunto de degradação e poluição, diminuindo sua disponibilidade (TUNDISI, 2003). Essa degradação, aliada ao crescimento populacional que vem aumentando a demanda pela água, ocasiona problemas de escassez e conflitos entre usos e usuários. Assim sendo, é fundamental que se estabeleçam processos de gestão eficazes na recuperação e utilização adequada deste bem natural, de forma a garanti-lo a geração atual e futura (ANEEL & ANA, 2001).

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) vêm sendo amplamente utilizados para inventário, análise, entendimento, modelagem e gerenciamento do meio ambiente (BURROUGH, 1997). A modelagem do meio ambiente contempla dois aspectos distintos (MOORE *et al.* 1993), auxiliar no entendimento do mundo físico, e fornecer uma ferramenta preditiva para gerenciamento.

Com este trabalho teve-se como objetivo o desenvolvimento de um modelo de dados espaço temporal em SIG para análise da qualidade da água em uma bacia hidrográfica. O uso de ferramentas que permitam avaliar a variação espacial e temporal da qualidade da água em uma bacia hidrográfica e, associá-la à ocorrência de determinados eventos possibilitará o conhecimento da influência causada pela ocupação humana, atividades econômicas e usos da água na bacia, fornecendo subsídios para o gerenciamento dos recursos hídricos.

A história da água sobre o planeta Terra é complexa e está diretamente relacionada ao crescimento da população humana, ao grau de urbanização e aos usos múltiplos que afetam a quantidade e a qualidade. Os usos da água geram conflitos em razão de sua multiplicidade e finalidades diversas, água para abastecimento público, hidroeletricidade, agricultura, transporte, recreação, turismo, disposição de resíduos, indústria, demandam quantidades e qualidades diferentes (TUNDISI, 2003).

Os problemas relativos à qualidade da água são decorrentes da contaminação gerada pela disposição inadequada de: resíduos líquidos e sólidos, de natureza doméstica e industrial; alterações provocadas por empreendimentos para geração de energia, resfriamento de águas de termoelétricas, além de práticas agrícolas e criação de animais (LIMA, 2001).

Para garantir a disponibilidade dos recursos hídricos, na quantidade e qualidade necessária para os usos múltiplos, o estabelecimento de processos de gestão eficientes é fundamental. O Brasil, a exemplo de outros países, está redefinindo seu sistema de gestão da água, implantando uma nova política de recursos hídricos, que

adota a bacia hidrográfica como unidade de planejamento, reconhece os usos múltiplos dos recursos hídricos e seu valor econômico e prevê instrumentos de controle sem desassociar os aspectos de qualidade e quantidade.

As variáveis que definem os recursos hídricos variam de um local para outro e de uma data para outra, portanto, interessa sobretudo conhecer a sua distribuição no espaço e no tempo. Para caracterizar a situação hidrológica da uma bacia é necessária a realização de inventários que medem no campo as variáveis hidrológicas e meteorológicas possibilitando, desta forma, a aplicação de modelos matemáticos para previsão de chuvas e ou vazões, e a quantificação das possibilidades de aproveitamentos dos recursos hídricos (ANEEL & ANA, 2001). Além disso, para a implementação de planos de prevenção e recuperação ambiental que visam proteger os corpos d'água dos efeitos da poluição, são necessários dados que indiquem o estado do ambiente aquático. Para atender a esta demanda são realizados programas de monitoramento para avaliar as substâncias presentes na água, medidas por meio de parâmetros que informam as características físicas, químicas e biológicas da mesma (SANTOS *et al*, 2001). Outrossim, a aplicação de modelos matemáticos que simulam o comportamento da qualidade da água tem sido bastante difundida como uma ferramenta auxiliar na obtenção de dados indicativos do ambiente aquático e simulação de condições futuras (CHAPRA, 1997).

As informações obtidas através dos programas de monitoramento da qualidade e quantidade da água são geralmente gerenciadas por sistemas computacionais alfanuméricos e armazenam a informação temporal por meio de séries históricas. Modelos numéricos de distribuição são usados para interpolar valores das medições de chuva e vazão para uma determinada região e apesar de utilizar os dados históricos, não são gerados mapas que representem seus comportamentos espaciais, e tampouco mostram a evolução do fenômeno ao longo do tempo.

Por outro lado, os SIGs têm, historicamente, representado o mundo como se ele existisse somente no presente, enfatizando sua representação espacial (PEUQUET, 1995; WORBOYS, 1995). As informações contidas em um banco de dados espacial podem ser adicionadas ou modificadas com o passar do tempo, porém a dinâmica da mudança através dos tempos não é mantida (PEUQUET, 1999). Os SIGs não são aptos a processar informações de entidades que estão além da capacidade de representação de seus modelos, portanto, a representação geográfica e o modelo de dados são críticos para melhorar a qualidade dos processamentos de consultas e das análises de informações geográficas (WORBOYS, 1995).

Responder a questão “qual a localização de uma entidade geográfica” é uma tarefa menos simples do que possa parecer, pois a resposta tanto pode ser genérica, por exemplo, em qual continente tal entidade se encontra, quanto precisa, como um par de coordenadas, ou um endereço, ou ainda, através da direção, da distância, ou da proximidade com outra entidade. Da mesma forma, questões relativas à dimensão temporal das entidades geográficas vão muito além do simples “quando”. De fato, envolver a dimensão temporal significa tratar de questões como: o que mudou desde então, com que rapidez, o que pode ter causado esta mudança, o que mais aconteceu neste mesmo período, o que ocorreu antes. A Geografia e outras disciplinas relacionadas têm desenvolvido métodos e ferramentas para ajudar a responder estas questões. Muitos desses métodos foram incorporados ao SIGs e o entendimento sobre espaço e tempo se reflete nos modelos de dados, funções e interfaces com o usuário (COUCLELIS, 1999).

A representação espaço-temporal tem sido uma das maiores demandas de desenvolvimento e pesquisa em Sistemas de Informações Geográficas, pois o uso destes sistemas por profissionais das mais variadas áreas, gera expectativas e demandas cada vez mais complexas. Aplicações mais abrangentes requerem novas maneiras de representar os dados integrando a dimensão espacial e temporal

(COUCLELIS, 1999). Muitos trabalhos têm sido realizados no intuito de atender essa demanda (LANGRAN e CHRISMAN, 1988; LANGRAN, 1992; PEUQUET e DUAN, 1995; WORBOYS, 1995; PEUQUET, 1999). Vários modelos bidimensionais de tempo foram implementados com sucesso por alguns pesquisadores. Também foram propostos modelos que utilizam noções mais complexas de tempo definido através de eventos, mudanças e processos, porém a maioria permanece no nível conceitual (COUCLELIS, 1999).

Para atingir o objetivo geral proposto, que é o desenvolvimento de um modelo de dados que permita análises da variação espacial e temporal da qualidade da água em uma bacia hidrográfica, definiu-se os seguintes objetivos específicos:

1. desenvolver um modelo de dados espaço-temporal para SIG para representar a variação da qualidade da água e seu relacionamento com os eventos e as fontes de poluição que interferem na qualidade da água em uma bacia hidrográfica;
2. compor uma base de dados georeferenciados das diversas fontes de poluição;
3. utilizar um modelo matemático para simular os efeitos das fontes de poluição sobre a qualidade da água;
4. implementar o modelo de dados espaço-temporal no SIG para simular variações espaço-temporais da qualidade da água.

Para o desenvolvimento deste trabalho utilizou-se das técnicas de modelagem e projeto de banco de dados da análise de sistemas, que compreende os métodos ou técnicas de solução de problemas ou tomada de decisão. A análise de sistemas se preocupa em informar-se sobre o problema, identificar as variáveis relevantes, analisar e sintetizar os diversos fatores e determinar uma solução ótima, ou pelo menos satisfatória para o problema proposto (WETHERBE, 1987).

Primeiramente foi realizada uma abrangente revisão bibliográfica sobre a semântica¹ de dados espaciais e temporais, os modelos de representação deste tipo de dados e os requisitos de uma aplicação espaço-temporal em SIG.

Para o correto conhecimento e entendimento do fenômeno qualidade da água e suas inter-relações com os diversos agentes externos foi realizada uma revisão bibliográfica sobre recursos hídricos e qualidade da água. A partir desse estudo concluiu-se que a qualidade da água em uma bacia hidrográfica é influenciada, basicamente, por dois tipos de fontes de poluição, a pontual e a difusa. A fonte pontual é aquela que tem um ponto bem definido de descarga e é, geralmente, contínua. Ao contrário, a poluição difusa pode entrar num determinado corpo hídrico por escoamento superficial (de área agrícolas e urbanas, etc.) e/ou pela atmosfera, ou seja, sem um ponto bem definido de descarga.

Nesta fase identificou-se a necessidade de utilização de um modelo matemático para simular a influência das fontes poluidoras acima descritas na qualidade da água (atual, passada e futura) em uma bacia hidrográfica. Dentre os vários modelos matemáticos de qualidade da água existentes, optou-se por utilizar o modelo QUAL2E desenvolvido pela EPA-USA (Environmental Protection Agency dos Estados Unidos da América). Este modelo tem sido largamente utilizado no estudo de alocação de lançamentos de resíduos em rios e permite a simulação de múltiplos lançamentos pontuais e não pontuais, captações, contribuição de afluentes, e estruturas hidráulicas dentro dos rios (CHAPRA, 1997).

¹ Semântica no contexto de modelagem de dados, é o significado de objetos ou conceitos no mundo físico ou abstrato (DATE, 1995).

Após a identificação dos elementos, relativos à qualidade da água, de relevância para este trabalho, foi realizada uma análise semântica destes dados, frente aos conceitos de dados espaço-temporais previamente identificados, considerando seus aspectos espaciais, temporais e semânticos.

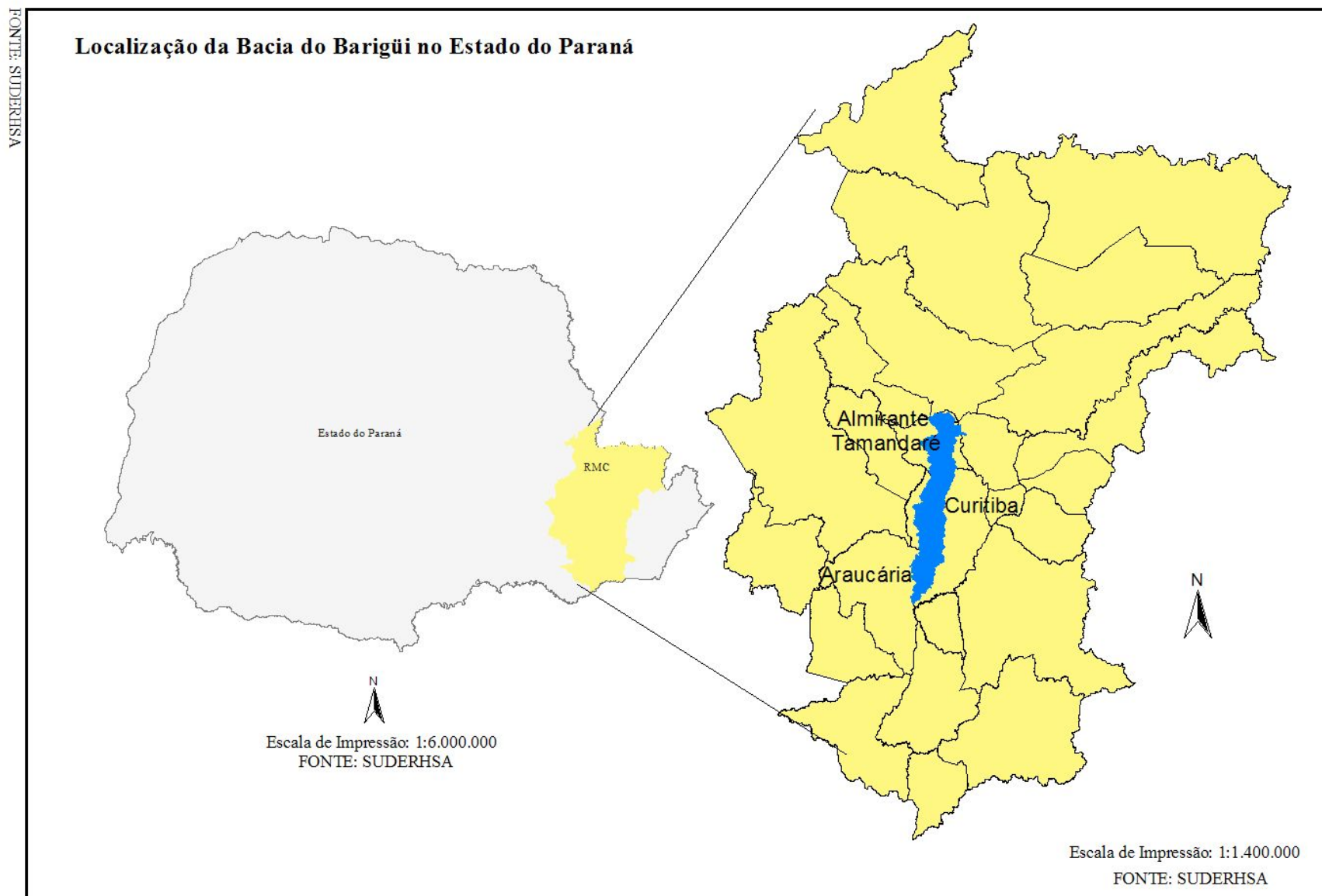
Concluída esta fase inicial da etapa de análise de sistemas, foi construído o modelo espaço-temporal para avaliação da qualidade da água em uma bacia hidrográfica utilizando-se das técnicas do modelo Entidade-Relacionamento.

Para representar a evolução da qualidade da água no espaço e no tempo utilizou-se uma adaptação do modelo “Dados Espaço-temporais baseado em Eventos – ESTDM”, proposto por PEUQUET e DUAN (1995). Este modelo é baseado em eventos, e utiliza o tempo como base para organizar os dados espaciais, permitindo registrar o momento e o local das mudanças ocorridas.

Com o objetivo de realizar análises espaço-temporais na bacia do Rio Barigüi para demonstrar sua eficiência, o modelo desenvolvido foi implementado utilizando-se o programa ArcView 3.2 e o banco de dados ACCESS.

A bacia do Rio Barigüi, apresentada na Figura 1.1, é uma das mais urbanizadas da Região Metropolitana de Curitiba (RMC). Além de ser uma área de grande concentração populacional, esta bacia engloba a Cidade industrial de Curitiba, contando com um grande número de indústrias, estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços, além de várias estações de tratamento de esgoto. Esta bacia foi selecionada por apresentar uma matriz de poluição bastante complexa e ter os dados de calibração necessários para a utilização do modelo QUAL2E, definidos pelo projeto “Avaliação de Benefício-Custo de Medidas de Controle de Cheias e Despoluição Urbana – Estudo de caso da Bacia do Rio Barigüi” (PROJETO BARIGÜI, 2003).

FIGURA 1.1 – LOCALIZAÇÃO DA BACIA DO RIO BARIGÜI



Os dados utilizados para compor a matriz das fontes de poluição da bacia e a base cartográfica foram provenientes, além do projeto acima mencionado, do projeto Cadastro de Usos e Usuários de Recursos Hídricos da Bacia do Alto Iguaçu (SUDERHSA, 1999), do Sistema de Informações Geográficas para Gestão de Recursos Hídricos (SUDERHSA, 2004) e do Cadastro de Indústrias de Curitiba (IPPUC, 2003).

O projeto “Avaliação de Benefício-Custo de Medidas de Controle de Cheias e Despoluição Urbana – Estudo de caso da Bacia do Rio Barigüi” dispunha de dados de população de 2000, e projeções populacionais para 2005, 2010 e 2020. Com o intuito de compor uma base de dados que pudesse mostrar a eficiência do modelo em simular eventos passados, presentes e futuros foram levantados também, os dados da população a partir do Censo do IBGE de 1996 e identificadas as datas de início e fim de atividade de indústrias e serviços, estações de tratamento de esgoto, aterros sanitários e lançamentos de esgoto *in natura*. Desta forma foi composta uma base de dados de 1996 a 2020 e identificados 13 eventos de impacto para a qualidade da água, na bacia do Barigüi

A partir do banco de dados implementado em ACCESS foram geradas as cargas poluidoras para todos os eventos e executado o programa QUAL2E para cada um deles. Os resultados das simulações do QUAL2E foram carregados no banco de dados e utilizando-se o ArcView, foram realizadas um série de consultas e análises para demonstrar as funcionalidades do modelo proposto.

2. SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS: REPRESENTAÇÃO DE DADOS ESPACIAIS E TEMPORAIS

2.1. SEMÂNTICA DE DADOS ESPAÇO-TEMPORAIS

Segundo COUCLELIS (1999) existem duas grandes categorias de conceitos geográficos com as quais a maioria das pessoas está familiarizada, seja através de suas atividades profissionais ou simplesmente como parte da vida cotidiana: entidades e fenômenos geográficos, e as propriedades e relações espaço-temporais que os caracterizam. A primeira categoria diz respeito às entidades e aos fenômenos em escalas geográficas e suas mudanças ao longo do tempo. As entidades geográficas podem ser naturais, como as montanhas, os rios, os vales, ou feições artificiais como as cidades e as rodovias. Os fenômenos são acontecimentos que alteram as entidades geográficas, tais como: incêndios, enchentes, seca, erosão, crescimento urbano. A segunda categoria engloba as noções de espaço e tempo aplicáveis às escalas geográficas, em particular, as relações espaciais e temporais entre entidades e fenômenos geográficos.

Conceitualmente, o objetivo básico de qualquer banco de dados temporal é registrar as mudanças ao longo do tempo. Mudança é normalmente descrita como um evento ou um conjunto de eventos. Para o propósito da modelagem espaço-temporal a melhor definição de evento é “uma mudança no estado de uma ou mais localizações, entidades, ou ambas”, por exemplo, uma mudança nas espécies dominantes de uma floresta, um incêndio florestal, a mudança de proprietário de uma área, ou a construção de uma estrada (PEUQUET, 1999).

Os eventos podem ser classificados em função de suas frequências e durações. Um evento único ou instantâneo é definido por um instante temporal, análogo a um ponto na dimensão espacial, ocorre uma única vez e não tem duração,

como por exemplo, o fechamento de uma fábrica (WORBOYS, 1995; PEUQUET, 1999; PRICE *et al.*, 1999; RAPER, 2000). Um evento contínuo, é definido por um intervalo temporal, análogo a uma linha na dimensão espacial, ocorre durante algum intervalo de tempo, por exemplo, a construção de uma estrada (WORBOYS, 1995; PEUQUET, 1999; PRICE *et al.*, 1999; RAPER, 2000). Um evento contínuo pode ser dominante, quando acontece a maior parte do tempo, como um evento de seca em uma determinada região (PEUQUET, 1999); ou esporádico, quando ocorre eventualmente, como um incêndio florestal (PEUQUET, 1999; PRICE *et al.*, 1999).

Eventos individuais podem ser agrupados, formando episódios, que por sua vez podem também ser agrupados em ciclos e exibir periodicidade (WORBOYS, 1995; PEUQUET, 1999; RAPER, 2000). Quanto à distribuição temporal os eventos podem ser classificados como caóticos, estáveis ou cíclicos. Pode-se agrupar, por exemplo, uma série de anos de seca em um episódio de seca. Este episódio pode, por sua vez, fazer parte do ciclo do El Niño. As variações no tamanho dos ciclos do El Niño podem ser vistas como caóticas. Por outro lado, distribuições perfeitamente cíclicas de eventos durante intervalos temporais longos são uma forma de comportamento estável como as estações do ano (PEUQUET, 1999).

Embora seja contínuo, o tempo é convencionalmente discretizado em unidades variáveis ou uniformes, com o objetivo de realizar medidas. Unidades de medida de tempo podem ser segundos, minutos, dias, estações ou outras unidades que forem convenientes (PEUQUET, 1999). A unidade de tempo utilizada depende de como o tempo é relacionado aos dados (WORBOYS, 1995; PRICE *et al.*, 1999).

As mudanças relacionadas às entidades ou regiões podem ser graduais ou repentinas. Mudanças repentinas são aquelas que podem ser causadas, por exemplo, por uma catástrofe, tal como um incêndio florestal. Mudanças graduais são associadas aos processos que são contínuos na natureza, como a variação da quantidade de chuva em uma determinada bacia (PEUQUET, 1999).

Uma variável temporal contínua é usada quando o processo requer que seja possível medir o tempo arbitrariamente, em qualquer ponto, como por exemplo, para acompanhar a movimentação de um veículo. Se o tempo é medido em intervalos com variação descontínua utiliza-se uma variável temporal discreta. Para exemplificar pode-se citar a alteração na posição de um limite administrativo, provavelmente esta mudança não ocorreu gradualmente e portanto não existe uma posição intermediária (WORBOYS, 1995).

O tempo pode ser dividido em intervalos regulares e irregulares, ou seja, podem existir observações, em intervalos fixos, de processos contínuos, tais como, acidez do solo, ou registros intermitentes de eventos discretos, tais como, tempestades. Pode-se também associar os dados a uma marca de tempo para indicar a validade de um fato ou a ocorrência de um evento (PRICE *et al*, 1999).

Uma representação do tempo linear e unidirecional é adotada por muitos modelos por se considerar que o tempo avança em direção ao futuro ordenadamente e sem ramificações, de forma que para dois eventos temporais diferentes, um será anterior ao outro. Um requisito importante na modelagem de aplicações geográficas é a capacidade de representar versões alternativas da mesma realidade, passado ou futuro, através da representação do tempo *ramificado* ou parcialmente ordenado. Este tempo trata de estados independentes, porém sincronizados, que permite que os resultados de vários modelos de simulação sejam comparados entre si ou com os dados observados (LESTER, 1990; LANGRAN, 1993; WORBOYS, 1995; PEUQUET, 1999, PRICE *et al.*, 1999; RAPER, 2000).

É necessário fazer distinção entre o tempo de existência de uma entidade no mundo real, e o tempo de existência desta entidade no sistema de informações. O *tempo válido*, também denominado de *tempo do evento* ou *tempo do mundo real*, é o período de ocorrência de um evento no mundo real, enquanto que *tempo de transação*, também denominado de *tempo da base de dados* é o momento em que a transação é

registrada no sistema de informações (WORBOYS, 1995; PRICE *et al.*, 1999; RAPER, 2000). O momento em que o dado é recuperado da base de dados é denominado de *tempo de referência* ou *tempo de leitura* (WORBOYS, 1995; PRICE *et al.*, 1999).

PRICE *et al* (1999) define cinco tipos diferentes de dados para aplicações espaço-temporais:

- dados espaciais: são dados que possuem somente um domínio espacial, por exemplo, limites de uma propriedade;
- dados temporais: são dados que possuem somente um domínio temporal, por exemplo, hora do voo;
- dados espaço-temporais: são dados espaciais cuja geometria se altera com o tempo (forma, tamanho, posição ou orientação);
- variação espacial, temporal ou espaço-temporal dos dados alfanuméricos: são dados que têm somente um domínio semântico, ou seja, não são nem espaciais e nem temporais (acidez do solo, por exemplo), e cujos valores se alteram com o tempo e/ou no espaço;
- dados compostos espaciais, temporais ou espaço-temporais: são dados cujos componentes que os formam mudam temporal ou espacialmente.

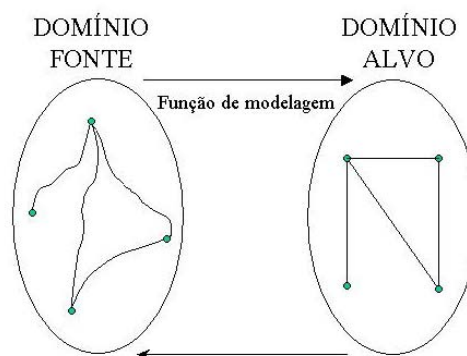
Nos três últimos casos, os atributos se alteram com o passar do tempo e/ou espacialmente, e portanto é necessário armazenar tanto o valor inicial quanto as variações que ocorrem.

2.2. REPRESENTAÇÃO ESPACIAL

Um dos principais componentes de um SIG é o banco de dados (WORBOYS, 1995). Um banco de dados espacial é qualquer conjunto de dados que descreva a semântica e as propriedades espaciais de um fenômeno do mundo real (BEDÁRD, 1999). Os dados que são armazenados no banco de dados ganham contexto e significado através das aplicações de domínio e se transformam em informações. Para que isto aconteça, no entanto, é necessário que os dados sejam coletados e carregados no sistema no formato apropriado. Os dados se transformam em informação quando são parte de uma estrutura de inter-relações que formam o contexto do domínio. Tal contexto é definido pelo modelo de dados (WORBOYS, 1995).

Um modelo de dados é uma construção artificial na qual partes de um domínio (*domínio fonte*) são representadas em outro domínio (*domínio alvo*). Qualquer fenômeno de interesse, quer sejam, entidades, relacionamentos ou processos, pode fazer parte do *domínio fonte*. Considere um viajante utilizando um mapa rodoviário para se locomover entre duas cidades, neste caso, as estradas são o *domínio fonte*, e o mapa o *domínio alvo* (WORBOYS, 1995). A Figura 2.1 representa o processo de modelagem do domínio fonte para o domínio alvo.

FIGURA 2.1 – O PROCESSO DE MODELAGEM DO DOMÍNIO FONTE PARA O DOMÍNIO ALVO



FONTE: Adaptado de WORBOYS (1995)

Um modelo é uma representação de algum fenômeno que deve ser entendido, lembrado, comunicado e testado. Os modelos são definidos com o intuito de incluir somente o que é relevante para o sistema em questão (BEDÁRD, 1999). Algumas aplicações requerem um modelo de dados relativamente simples, por exemplo, num sistema de biblioteca, dados sobre livros, usuários, reservas e empréstimos são estruturadas de uma maneira muito clara. Muitas outras aplicações incluindo os SIGs, demandam um modelo de dados mais complexo (WORBOYS, 1995).

Para qualquer banco de dados, o modelo de dados determina o que pode ser feito facilmente, com dificuldade ou o que não pode ser feito, uma vez que o sistema tenha sido implementado (BEDÁRD, 1999). Como a capacidade de representação dos SIGs é limitada pela capacidade de representação de seus modelos, a representação geográfica e o modelo de dados são críticos para melhorar a qualidade dos processamentos de consultas e das análises de informações geográficas (WORBOYS, 1995).

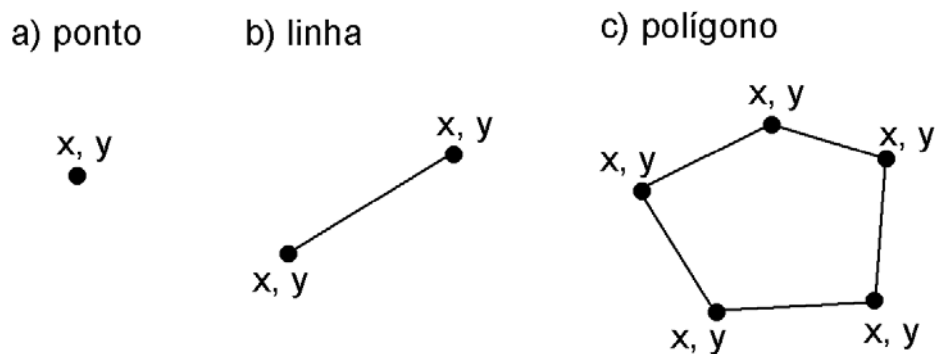
Modelos de dados para SIG têm, tradicionalmente, enfatizado a representação espacial do mundo real (PEUQUET, 1995; WORBOYS, 1995). Conforme a natureza da entidade geográfica, os modelos de dados para SIG são baseados em *objetos*, para representar entidades discretas, ou *campo*, para representar campos contínuos (COUCLELIS, 1999). Esta abordagem assume que uma entidade geográfica é ou discreta ou contínua. Uma entidade é discreta quando pode ser definida como um indivíduo que possui identidade relativamente permanente (COUCLELIS, 1999), como por exemplo, casa, estrada, poste de energia. Por outro lado, uma entidade é contínua quando é distribuída continuamente no espaço, tal como temperatura, terreno, e tipo de solo.

Filosoficamente, a representação baseada em *objeto* corresponde à visão *relativa* do espaço, proposta por Newton, que existe independentemente e é povoado

por entidades discretas, onde podem existir espaços vazios. Já a abordagem baseada em *campo* reflete uma perspectiva *absoluta* do espaço, na qual não existe espaço vazio, ou seja, espaço sem campo e cada espaço tem que ter um e somente um valor (YUAN, 2001).

A representação de uma entidade discreta é feita através de estruturas vetoriais. Unidades vetoriais são caracterizadas pelo fato de que sua localização geográfica pode ser definida individualmente e de forma precisa, por um ou mais pares de coordenadas. Nesta representação uma entidade é modelada em função de sua localização e atributos. As três formas básicas de representação vetorial são: pontos, linhas e polígonos. Um ponto é representado por um simples par de coordenadas (x , y), e um atributo indicando a que tipo de entidade este ponto se refere, por exemplo, uma estação de monitoramento climatológica. Uma linha consiste de um conjunto de coordenadas (x , y) e um atributo que a identifique, por exemplo rio ou estrada. Um polígono é delimitado por um conjunto de coordenadas (x , y) e o atributo de identificação, por exemplo uma bacia hidrográfica ou um lote. A topologia² entre entidades é armazenada explicitamente através de apontadores no banco de dados (BURROUGH, 1998). A Figura 2.2 ilustra a representação de entidades geográficas com estrutura vetorial, ponto, linha e polígono.

FIGURA 2.2 – REPRESENTAÇÃO VETORIAL DE ENTIDADES GEOGRÁFICAS



² Relações espaciais existentes entre as entidades, tais como, conectividade, contigüidade e proximidade (TEIXEIRA e CHRISTOFOLETTI, 1997).

Para representar uma entidade contínua é utilizada a estrutura matricial que consiste no uso de uma malha quadriculada regular, onde a cada célula é associado um código referente à entidade. A localização de uma entidade é definida pela referência direta às células desta malha, que são associadas a uma área na superfície da Terra. A resolução ou escala deste tipo de dado é definida pela relação entre o tamanho da célula e a área por ela coberta no terreno. A topologia entre diferentes entidades é implicitamente codificada através dos valores de atributos das células (BURROUGH, 1998). Na Figura 2.3 é mostrada uma representação matricial de uma entidade geográfica.

FIGURA 2.3 – REPRESENTAÇÃO MATRICIAL DAS ENTIDADES GEOGRÁFICAS

1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
1	1	1	2	2	3	3	3	2	2
1	1	1	2	2	3	3	3	2	2
1	1	1	1	3	3	3	2	2	2
1	1	1	1	3	3	3	2	2	2
2	1	3	3	3	3	3	3	2	2
2	1	1	2	2	3	3	3	2	2
2	2	2	3	2	3	3	3	2	2
2	2	3	3	3	3	3	3	2	2
2	2	2	3	2	3	3	3	2	2
2	1	1	1	1	3	3	3	2	2
2	1	1	1	1	3	3	3	3	3

Recentemente tem sido considerado que alguns fenômenos geográficos possuem características de ambas as abordagens *campo e objeto* e que as informações necessárias para pesquisa e operações destes fenômenos requerem uma representação *objeto-campo* integrada (YUAN, 2001). Estes fenômenos, denominados fenômenos geográficos dinâmicos, podem se movimentar, se dividir, se agregar e seus atributos podem variar sobre a localização e com o tempo. Como exemplo deste tipo de fenômeno, pode-se citar o incêndio. O incêndio pode ser visto como um objeto

discreto, com limites definidos mas também apresenta variações espaciais e temporais, pode ou não ser contínuo, e pode ou não reiniciar após ter sido praticamente contido. Outros fenômenos geográficos com estas características podem ser citados, tais como, epidemias, chuvas e furacões (YUAN, 2001).

2.3. REPRESENTAÇÃO DE DADOS ESPAÇO-TEMPORAIS EM SIG

Muitos trabalhos têm sido realizados nas últimas décadas no intuito de integrar a dimensão temporal ao SIG, vários modelos foram apresentados e cada um deles possui uma estrutura própria de organização dos dados para armazenar as mudanças ocorridas ao longo do tempo. Em 1988, ARMSTRONG apresentou o modelo “retratos sequenciais” (*sequent snapshots*), que se baseia no tempo para organizar as mudanças ocorridas em uma localização; neste mesmo ano LANGRAN e CHRISMAN apresentaram o modelo “composição espaço-temporal”, baseado em localização; em 1989, LANGRAN apresentou o modelo “estado inicial com emendas” (*base state with amendments*), baseado em entidades geográficas. Em 1992, WORBOYS apresentou o modelo “Objeto Espaço-temporal” (*Spatiotemporal Object Model*), baseado em objetos espaciais; também em 1992, KUCERA e SONDEHEIM apresentaram o modelo *Spatial Archive and Interchange Format* – SAIF, orientado a objeto. Em 1994, PEUQUET apresentou um modelo híbrido denominado TRIAD, que utiliza três modelos de representação (localização, objeto e tempo), para tratar de forma distinta espaço e tempo. Em 1995, PEUQUET e DUAN apresentaram o modelo “Dados Espaço-temporais baseado em Eventos” (*Event-based Spatio-Temporal Data Model – ESTDM*), baseado em eventos e processos; neste mesmo ano RAPER e LIVINGSTONE desenvolveram o “Modelo de Dados Geomorfológicos Orientado a Objeto” e em 1999, YUAN apresentou um modelo hierárquico com 3 domínios para representar fenômenos geográficos dinâmicos, fazendo uma fusão das abordagens “retratos sequenciais”, “composição espaço-temporal” e “objeto espaço-temporal”.

Todos esses modelos são capazes de representar as mudanças ocorridas em um objeto ou localização, porém os modelos objeto espaço-temporal, ESTDM, Oogeomorph e hierárquico com 3 domínios foram desenvolvidos com o intuito de representar fenômenos geográficos dinâmicos. Com estes modelos não somente se pode representar as mudanças nas propriedades de uma determinada região como também manter registro de como a propriedade e localização de um objeto discreto se alteram ao longo do tempo (YUAN, 2001).

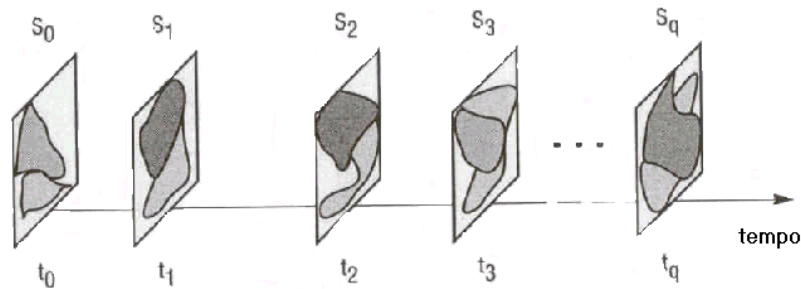
2.3.1 Modelo “retratos seqüenciais”

O modelo “retratos seqüenciais”, proposto por ARMSTRONG em 1988, baseia-se em uma série temporal de cenários espacialmente registrados. Geralmente emprega um modelo de dados *campo*, embora um modelo *objeto* também possa ser usado. O modelo “retratos seqüenciais” propõe uma redefinição do que é armazenado em níveis temáticos individuais. Ao invés de armazenar, em um único nível de informação, todas as informações relativas a um domínio temático (por exemplo, uso do solo), neste modelo um nível contém informação de um único domínio temático em um momento conhecido (PEUQUET, 1999). Os dados são, portanto, armazenados como uma série de intervalos temporais discretos, não necessariamente uniformes. A característica deste modelo é que a situação do mundo real em um determinado momento é armazenada completamente, tudo é incluído, independente de ter sido alterado ou não desde o último cenário (LANGRAN, 1992).

Este modelo permite identificar facilmente o estado de qualquer localização ou entidade em um determinado momento, porém o volume e a redundância dos dados aumenta consideravelmente, uma vez que cada cenário é um mapa completo de uma determinada região, além de que as mudanças ocorridas são registradas implicitamente. Neste modelo não é possível identificar exatamente quando uma mudança ocorreu (LANGRAN, 1992; PEUQUET, 1999).

A Figura 2.4, ilustra a representação de dados espaço-temporais por meio de “retratos seqüenciais”. Cada cenário, S_n , representa o estado de um determinado local em um determinado momento, t_n .

FIGURA 2.4– MODELO “RETRATOS SEQÜENCIAIS”



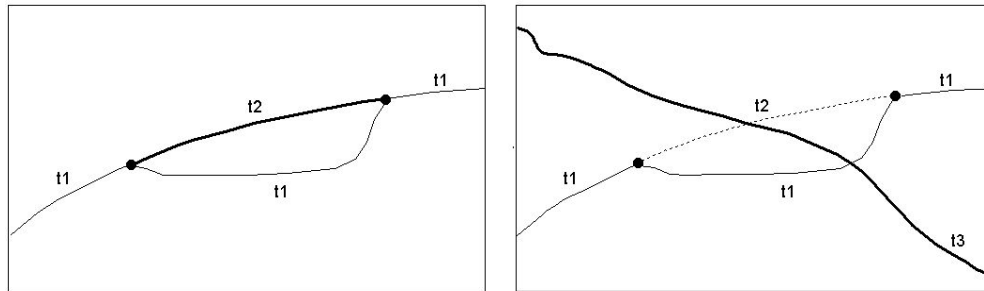
FONTE: Adaptado de PEUQUET (1999)

2.3.2 Modelo “estado inicial com emendas”

Este modelo também denominado de “vetor emenda”, proposto por LANGRAN em 1989, utiliza um modelo tridimensional (2 dimensões espaciais e 1 dimensão temporal).

O modelo registra explicitamente as mudanças ocorridas ao longo do tempo, baseando-se em entidades geográficas ao invés de localização. Utiliza a abordagem de modelo de dados *objeto* e registra as mudanças ocorridas na geometria das entidades geográficas. A partir de uma base inicial, qualquer mudança em uma entidade poligonal ou linear é registrada incrementalmente, através de um vetor emenda, criando um novo objeto, conforme demonstrado na Figura 2.5, que apresenta a evolução histórica de um conjunto de rodovias. No primeiro quadro a linha fina mostra a configuração original da rodovia em um momento t_1 . Num momento posterior, t_2 , a configuração original da rodovia foi alterada. O segundo quadro mostra a construção de uma nova rodovia, no momento t_3 . O momento em que ocorre a mudança, t_n , é registrado como um atributo de cada vetor (LANGRAN, 1992).

FIGURA 2.5 - ABORDAGEM “VETOR “EMENDA”



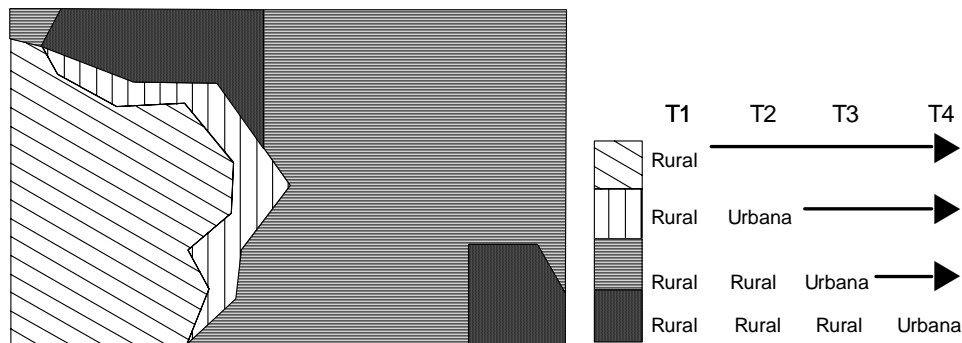
FONTE: Adaptado de PEUQUET (1999)

Além de manter explicitamente a integridade de entidades individuais e a topologia das mudanças ao longo do tempo, a abordagem baseada em “vetor emenda” apresenta a vantagem de estar apta a representar mudanças assíncronas nas entidades geométricas e facilitar a realização de consultas sobre mudanças em determinada localização (PEUQUET 1999). No entanto, à medida que o número de vetores emenda aumenta, a topologia espaço-temporal destes vetores se torna cada vez mais complexa.

2.3.3 Modelo “composição espaço-temporal”

O modelo “composição espaço-temporal”, proposto por LANGRAN e CHRISMAN (1988), utiliza a abordagem de modelo de dados *objeto* e se baseia em unidades de atributo único, espacialmente homogêneas e temporalmente uniformes. Cada unidade apresenta uma mudança distinta no valor do atributo ao longo do tempo (YUAN, 2001). A partir de uma base cartográfica que representa a realidade em um determinado momento, a cada mudança são adicionados novos nós e conexões formando novos polígonos com histórico individual. Cada unidade possui uma lista ordenada de registros, que contém um conjunto de atributos e o momento em que esse conjunto de atributos é válido. A Figura 2.6 mostra a evolução de uma área rural para uma área urbana através de uma composição espaço-temporal. Cada polígono tem um atributo distinto dos vizinhos (LANGRAN, 1992)

FIGURA 2.6 – MODELO “COMPOSIÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL”



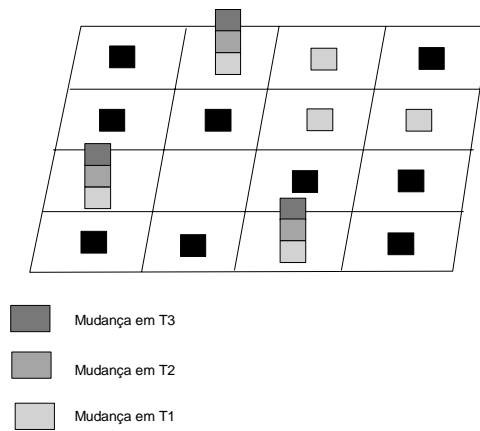
FONTE: Adaptado de LANGRAN (1992)

Este modelo apresenta duas desvantagens: os elementos vão se decompondo, progressivamente, em unidades menores, aumentando o volume dos dados; e cada vez que um objeto se divide em dois, cada ocorrência do objeto antigo é efetivamente substituída por dois novos objetos como novos identificadores, aumentando a complexidade das operações (LANGRAN, 1992).

2.3.4 Modelo “composição espaço temporal” baseado na abordagem *campo*

Alternativamente ao modelo “composição espaço temporal” baseado na abordagem de modelo *objeto*, e ao modelo “retratos sequenciais”, baseado na abordagem *campo*, LANGRAN (1992) propôs um modelo “composição espaço temporal” baseado na abordagem de modelo *campo*. Neste modelo, a cada célula da matriz é associada uma lista de atributos, de tamanho variável. Cada entrada nesta lista se refere a uma mudança ocorrida naquela localização específica, e registra o novo valor da célula e o momento em que esta mudança ocorreu (Figura 2.7). Desta forma cada lista apresenta um histórico de eventos para aquela célula (localização), ordenados temporalmente, sendo que o registro mais recente se refere à situação atual. Ao contrário da representação baseada em “retratos”, esta representação armazena apenas as mudanças relativas a cada localização, o que elimina a redundância de informações (PEUQUET, 1999).

FIGURA 2.7 – “COMPOSIÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL” (MODELO CAMPO)



FONTE: adaptado PEUQUET (1999).

2.3.5 Modelo TRIAD

O modelo TRIAD, apresentado por PEUQUET (1994), propõe uma estrutura híbrida para tratar distintamente espaço e tempo, utilizando três tipos de modelos de representação para criar um histórico do mundo real: um *modelo de localização*, um *modelo de objeto* e um *modelo de tempo*. Os modelos de localização e de tempo se baseiam na abordagem de modelo de dados *campo*, enquanto o modelo de objeto emprega a abordagem de modelo de dados *objeto*.

As mudanças são armazenadas nos modelo de localização e de objeto e referenciadas no modelo de tempo. Desta forma, as informações relativas à abrangência da mudança e ao tipo de objeto alterado são armazenadas no *modelo de objeto*, as mudanças ocorridas em uma localização são armazenadas no *modelo de localização*, enquanto os detalhes de cada evento (momento e localização da ocorrência) são armazenados cronologicamente, formando uma cadeia de eventos, no *modelo de tempo*. Para cada fenômeno (por exemplo, mudança no uso do solo) é criada uma cadeia de eventos (RIISE, 1999; RAPER, 2000).

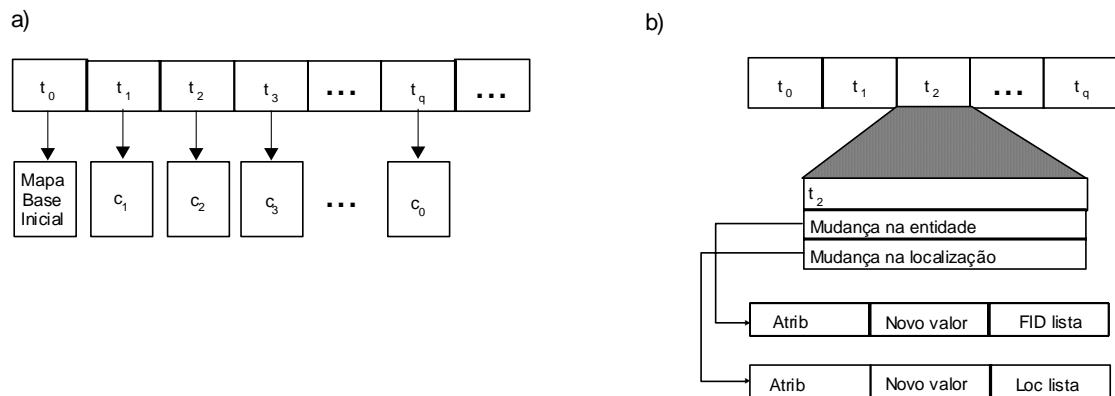
O *modelo de objeto* utiliza os paradigmas da orientação a objeto, ou seja, hierarquia, os objetos podem herdar atributos de objetos pais (por exemplo, um pinheiro é uma árvore), e associações, à medida que os objetos vão se alterando eles podem se agrupar ou se dividir em novos, dependendo do processo envolvido (RIISE, 1999). Com este modelo é possível responder questões relacionadas ao objeto, à localização e ao tempo, tais como, “Qual a localização deste objeto em um determinado momento?”, “O que existia neste local em um determinado momento?”, “Quando determinado objeto esteve neste local?”. A desvantagem deste modelo é que ele se aplica somente à entidades geográficas com identidade temporal e espacial discreta (RAPER, 2000).

2.3.6 Modelo ESTDM

O modelo “Dados Espaço-temporais baseado em Eventos”, proposto por PEUQUET E DUAN (1995) usa o tempo como base para organizar os dados espaciais, registrando as mudanças ocorridas em uma matriz e representando um único tema geográfico, por exemplo, temperatura (YUAN, 2001). Este modelo utiliza um modelo de dados *campo* e permite registrar o momento e o local das mudanças ocorridas. Como se pode observar na Figura 2.8, nesta representação todas as mudanças são armazenadas em uma lista de eventos, através de um conjunto de células modificadas ($C_1, C_2 \dots C_n$), como uma seqüência de eventos ao longo do tempo. A partir de uma base inicial, a cada ocorrência de um evento, é inserido um registro de tempo, em ordem temporal crescente, em uma linha do tempo, como mostra a Figura 2.8a. Desta forma, o intervalo entre dois eventos sucessivos pode ser obtido pela diferença entre dois registros de tempo. Cada registro ao longo da linha do tempo pode ser associado a um conjunto particular de entidades e localizações (Figura 2.8b) que se alteraram naquele momento e uma notação das mudanças específicas. Para tratar das mudanças graduais, um evento é armazenado, através de um registro de tempo, quando se

considera que houve uma mudança significativa desde o último registro. O modelo pode também ser estendido para denominar explicitamente o início e o fim de mudanças graduais longas ou episódios.

FIGURA 2.8 – MODELO ESTDM



FONTE: Adaptado de PEUQUET (1999)

No ESTDM as mudanças relativas ao tempo são armazenadas explicitamente, e tem a vantagem de facilitar consultas baseadas no tempo (PEUQUET, 1999). Cada seqüência de eventos representa a manifestação espaço-temporal de algum processo, o que torna possível registrar como os processos evoluíram no espaço e no tempo (YUAN, 2001).

2.3.7 Modelo Oogeomorph

RAPER e LIVINGSTONE (1995) desenvolveram um modelo, orientado a objeto, para modelagem de dados geomorfológicos denominado “Modelo de Dados Geomorfológicos Orientado a Objeto” (*Object-Oriented geomorphologia data model – Oogeomorph*). Este modelo segue a abordagem de modelo de dados *objeto*, representando as entidades geográficas com dados pontuais agregados a uma extensão espacial e temporal.

A base do Oogeomorph é uma ferramenta CASE (*computer-aided software engineering*) capaz de construir modelos de dados que implementam diretamente entidades e relacionamentos espaço-temporais num ambiente de quatro dimensões integrado. Neste modelo cada observação tem seus próprios atributos espaço-temporais, de localização e de tempo (ano/mês/dia e horas/segundos). A referência espacial pode ter uma, duas ou três dimensões e descreve a localização em que aquela observação foi medida. A referência temporal tem uma dimensão, e diz respeito ao momento em que o valor da observação foi conhecido. O modelo requer que o valor observado, o local e horário em que a observação foi feita sejam conhecidos ou inferidos a partir de outros modelos, e armazenados como atributos das classes de observação.

2.3.8 Modelo “Objeto Espaço-temporal”

O “modelo Objeto Espaço-temporal” proposto por WORBOYS (1992), foi projetado utilizando a abordagem de orientação a objeto e representa as feições geográficas como objetos espaço-temporais 3D discretos (1D tempo e 2D espaço).

O “modelo Objeto Espaço-temporal” apresenta uma estrutura hierárquica de objetos e átomos espaço-temporais, com os quais a composição espacial do fenômeno geográfico pode ser explicitamente registrada ao longo do tempo. Um objeto espaço-temporal é uma agregação de átomos espaço-temporais, a maior unidade espacial e temporalmente homogênea cujas propriedades existem tanto no espaço quanto no tempo. Portanto este modelo é capaz de registrar as mudanças ocorridas nos atributos de um objeto tanto na dimensão espacial quanto na temporal, junto ou separadamente, projetando seus átomos para o espaço temporal e/ou espacial. Desta forma, o modelo pode representar como um objeto espaço-temporal evoluiu em sua forma, propriedades e localização, tal como a evolução de mudanças no uso do solo (YUAN, 2001).

2.3.9 Modelo SAIF

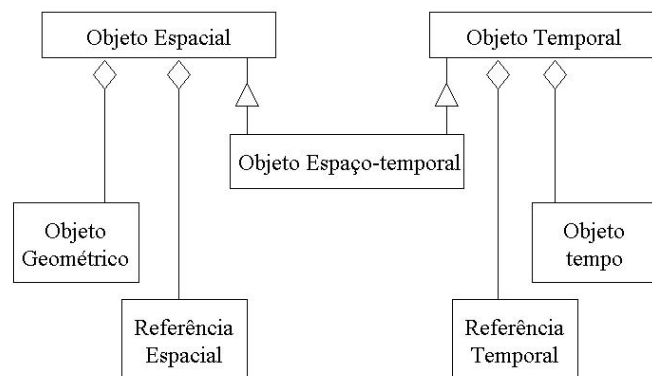
O modelo *Spatial Archive and Interchange Format* – SAIF (KUCERA e SONDEIM, 1992) é um modelo espaço-temporal orientado a objeto. Este modelo foi desenvolvido pelo Setor de Levantamento e Mapeamento de Recursos (*Surveys and Resource Mapping Branch* – SRMB) do Ministério do Meio Ambiente do Canadá (*BC Environment, Lands, and Parks*), e reconhecido em 1993 como formato padrão de intercâmbio de dados pelo *Canadian General Standards Board, Committee on Geomatics*. O SAIF é um modelo e também um formato padrão para o compartilhamento de dados espaciais e espaço-temporais, e pode ser usado para modelagem, intercâmbio e armazenamento de dados geográficos (SAFE SOFTWARE INC., 2003)

No SAIF os objetos são considerados como instâncias de tipos (classes) as quais seguem uma hierarquia. São reconhecidos três tipos de associações: generalização/especialização, agregação, e associações simples entre objetos. Cada objeto é único e pode ser referenciado por um identificador. Este modelo não trata outros conceitos de orientação a objeto, tais como, métodos, mensagens e comportamento (SAFE SOFTWARE INC., 2003).

Na visão tradicional de SIG, os dados espaciais (polígonos, linhas, pontos) são associados com atributos (descrição textual da informação). O SAIF introduz estruturas de alto nível que contém um número arbitrário de atributos que descrevem espaço, tempo e topologia bem como atributos alfanuméricos. Desta forma, a informação espacial passa a ser um atributo do objeto, por exemplo, uma floresta tem vários atributos, tipos de espécies de plantas e uma posição no espaço representada por um polígono. O termo atributo é usado independentemente da natureza do atributo. Este modelo define um objeto espaço-temporal como um objeto que ocupa uma região no espaço e no tempo. Um objeto espaço-temporal tem quatro aspectos: geometria,

referência espacial, tempo e referência temporal (Figura 2.9). A geometria define a forma do objeto e é expressa em termos de ponto, linha, área e volume (valores de coordenadas fazem parte da geometria). A referência espacial indica o sistema de referência horizontal e vertical das coordenadas. Os valores de tempo podem indicar tempo relativo ou absoluto, datas, bem como durações. A referência temporal define se os valores de tempo são baseados no sistema de tempo universal (BRITISH COLUMBIA, 1995).

FIGURA 2.9 – ESTRUTURA DE UM OBJETO ESPAÇO-TEMPORAL NO SAIF



FONTE: adaptado de BRITISH COLUMBIA (1995)

Com esta estrutura é possível modelar adequadamente dados espaço-temporais e informações tradicionais bem como trabalhar com todos os tipos de dados geográficos, com ou sem atributos, com estruturas vetoriais ou matriciais, com duas ou três dimensões (BRITISH COLUMBIA, 1995).

2.3.10 Modelo proposto por YUAN

YUAN (1999) apresentou um modelo para representar fenômenos geográficos dinâmicos, que possuem tanto características de campo quanto de objeto, com três domínios, fazendo uma fusão das abordagens “retratos seqüenciais”, “composição espaço-temporal” e “objeto espaço-temporal”, através do armazenamento dos dados nos domínios semântico, temporal e espacial (RAPER 2000).

Neste modelo a representação é hierárquica, e consiste de um nível de evento (modelo de dados *objeto*), um nível de processo (modelo de dados *objeto*) e um nível de estado (modelo de dados *campo*). Conforme mostra a Figura 2.10, o nível de evento armazena todas as ocorrências de eventos e seus atributos (horário inicial e final). Cada evento é, por sua vez, associado ao conjunto de processos abrangidos pelo evento, armazenados no nível de processo. Cada processo é associado a um conjunto de estados, e é criada uma tabela de atributos de processo para armazenar as características individuais de cada processo. Da mesma forma, todas as áreas chuvosas são associadas a cada estado. Cada nível de estado contém todas as áreas chuvosas em um determinado período. Pela Figura 2.10 pode-se observar, por exemplo, que o evento 1 pode ser formado pelos processos 2 e 3. O processo 2 pode, por sua vez, abranger a área chuvosa 1 no estado 2 e as áreas 1 e 2 no estado 3, enquanto o processo 3 pode abranger a área chuvosa 2 no estado 2 e áreas 2 e 3 no estado 3 (YUAN, 2001).

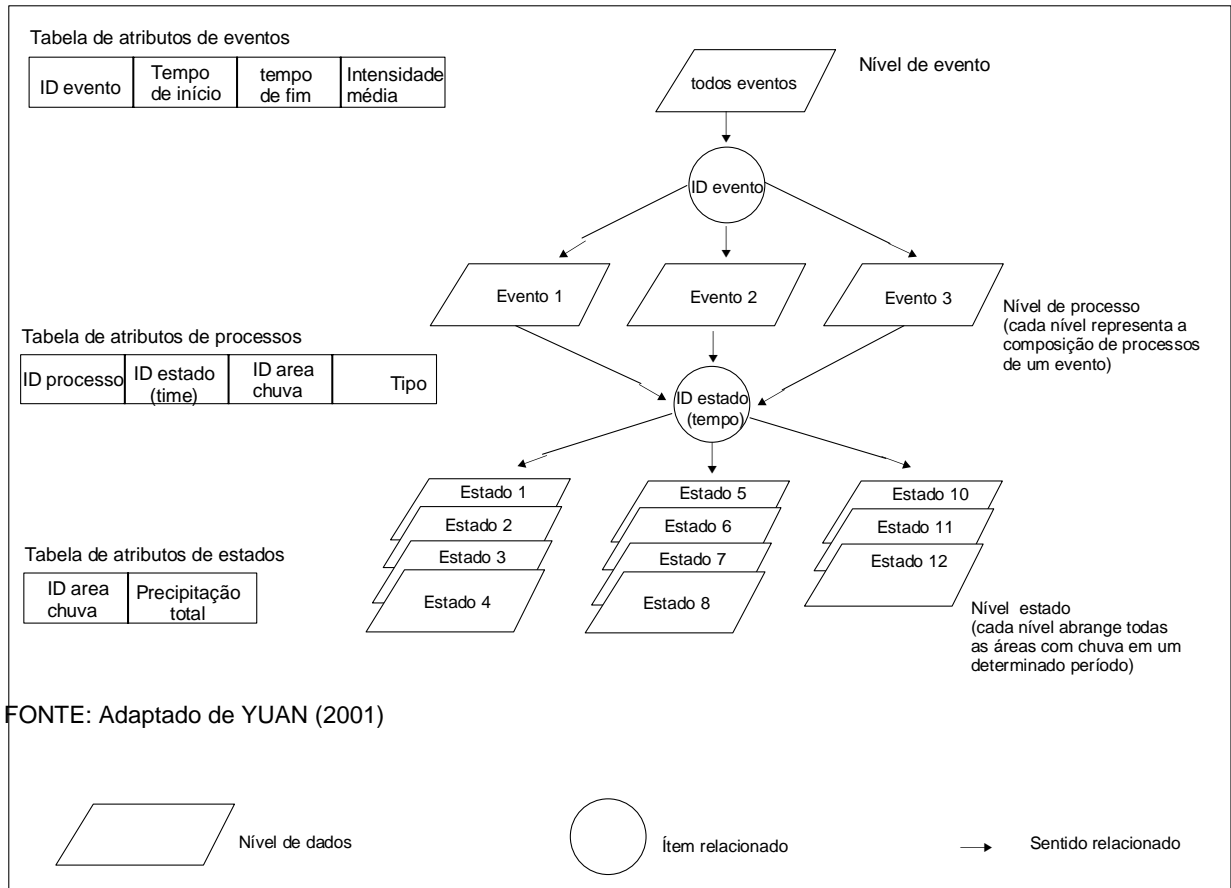
Com esta estrutura, propriedades do tipo *objeto* são armazenadas através de eventos, e processos e propriedades do tipo *campo* são armazenadas no nível de estado. O nível de evento fornece a informação “do que aconteceu”, e o nível de processo a informação de “como aconteceu”.

Para demonstrar a eficiência do modelo proposto, YUAN (2001) implementou um protótipo no software Arc/INFO GIS 7.2³, usando dados de precipitação da região de Oklahoma (Estados Unidos), de um período em que ocorreram várias tempestades (15/04 a 22/05 de 1998). O fenômeno tempestade foi escolhido por ser um exemplo de fenômeno geográfico dinâmico, a precipitação varia de intensidade durante uma tempestade e é melhor representada como *campo*, porém uma tempestade pode ser isolada como um *objeto* individual que se move no espaço e

³ Software de propriedade de Environmental Systems and Research Institute –ESRI Redlands, California

no tempo (YUAN, 2001).

FIGURA 2.10- ESTRUTURA HIERÁRQUICA DE EVENTOS, PROCESSOS E ESTADOS



FONTE: Adaptado de YUAN (2001)

Através deste protótipo YUAN (2001) pode demonstrar que o modelo é capaz de fornecer informações sobre as dinâmicas do fenômeno geográfico, tais como, caminho e velocidade da tempestade, em função da melhoria do potencial das consultas espaço-temporais sobre frequência, duração, movimento e relações espaço-temporais. Este modelo apresenta duas vantagens, integra os modelos *campo* e *objeto*, representando eventos e processos como *objetos* discretos e a variação temporal dos fenômenos como *campo*, e permite que eventos e processos sejam usados como filtros, para melhorar o desempenho da realização de consultas.

O Quadro 2.1, apresenta uma comparação das características dos modelos apresentados.

Continua

QUADRO 2.1- COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS DE DADOS ESPAÇO-TEMPORAIS PARA SIG

MODELO	REPRESENTAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL POR:	MODELO DE DADOS	COMO REGISTRA AS MUDANÇAS	BASEADO	VANTAGEM	DESVANTAGEM
Retratos Seqüenciais ARMSTRONG (1988)	Matriz de um domínio de um tema (cenários)	Campo ou objeto	Gera um novo cenário com todas as feições independentemente do que foi alterado	Localização e tempo	Consulta sobre qualquer local ou entidade em dado momento	Volume e redundância dos dados
Composição Espaço-temporal LANGRAN e CRHISMAN (1988)	Unidades de atributo único, espacialmente homogêneas e temporalmente uniformes	Objeto	Novos nós e conexões formam novos polígonos com histórico individual	Entidade geográfica	consulta sobre mudanças em determinado local	Volume de dados e Complexidade das operações
Vetor Emenda LANGRAN (1989)	Coordenadas tri-dimensional (2 dimensões espaciais e uma dimensão temporal)	Objeto	Na geometria das entidades geográficas, através de um vetor emenda e a criação de um novo objeto	Entidade geográfica	Reproduz mudanças assíncronas e, consulta sobre mudanças em determinado local	Topologia espaço- temporal complexa
Composição Espaço-temporal LANGRAN (1992)	Matriz associada a uma lista de atributos	Campo	Novo registro na lista de atributos com novo valor e data	Localização	Elimina a redundância de dados	
Objeto espaço-temporal WORBOYS (1992)	Objetos espaço-temporais 3D discretos (1D tempo e 2D espaço) Orientado a objeto	Objeto	Através de átomos espaciais temporal e espacialmente uniformes	Objetos espaço- temporais	Evolução na forma, propriedades e localização de objetos	Não representa fenômenos dinâmicos
SAIF KUCERA e SONDHEIM (1992)	Objetos espaço-temporais 3D discretos (1D tempo e 2D espaço) Orientado a objeto	Campo e objeto	Através do atributo de tempo de uma classe ou objeto	Objetos espaço- temporais	Facilidade de uso Implementado e reconhecido como padrão	Nem todos os programas SIG comerciais implementam a orientação a objeto
TRIAD PEUQUET (1994)	3 modelos de representação: - localização - objeto - tempo	2 campos 1 objeto	Armazena as alterações nos modelos de localização e objeto e referencia no modelo tempo	Estrutura híbrida	Consulta sobre objeto, localização e tempo	Não representa fenômenos dinâmicos

Conclusão

QUADRO 2.1- COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS DE DADOS ESPAÇO-TEMPORAIS PARA SIG

MODELO	CARACTERÍSTICAS	MODELO DE DADOS	COMO REGISTRA AS MUDANÇAS	BASEADO	VANTAGEM	DESVANTAGEM
ESTDM PEUQUET e DUAN (1995)	Matriz associada a uma lista de eventos	Campo	Lista de eventos	Eventos (tempo) e processos	Consultas sobre tempo Mostra transição e Alteração na propriedade e localização de um objeto	Não representa mutação e movimento de um objeto dinâmico
Oogeomorph RAPER e LIVINGSTONE (1995)	Quadri-dimensional Objetos de dados pontuais agregados a uma extensão espacial e temporal	Objeto	1 novo registro para cada observação, com localização (X,Y,Z) e tempo (ano/mês/dia/hora)	Processos	Mostra transição e Alteração na propriedade e localização de um objeto	Não representa mutação e movimento de um objeto dinâmico
Hierárquico com 3 modelos YUAN (1999)	3 modelos de representação: - evento - processo - estado	Campo e objeto	Eventos associados a um conjunto de processos, associados a um conjunto de estados	Processos	Representa transição, mutação e movimento de Fenômenos dinâmicos	

2.4. REQUISITOS DE UMA APLICAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL EM SIG

O objetivo de uma aplicação espaço-temporal é permitir a avaliação de como um fenômeno se comporta no espaço e no tempo. As funções que uma aplicação espaço-temporal em SIG deve contemplar são inventário, análise, atualização, controle de qualidade, agendamento e apresentação. As funções de inventário, análise, atualização, controle de qualidade e apresentação são obrigatórias enquanto a função de agendamento é opcional (LANGRAN, 1992).

A função de inventário é crítica para uma aplicação espaço-temporal em SIG pois um dos requisitos deste tipo de aplicação é ter a capacidade de armazenar a descrição mais completa possível de uma determinada região e as mudanças que ali ocorreram. Uma aplicação espaço-temporal em SIG deve estar apta a representar tanto a evolução de uma única entidade ou uma região ao longo do tempo, como a situação de uma entidade ou local específico em um determinado momento (LANGRAN, 1992). Considere, por exemplo, a evolução de áreas rurais para áreas urbanas no perímetro de um município. Uma aplicação espaço-temporal deve estar apta a mostrar como as áreas rurais foram se transformando em urbanas ao longo do tempo, e também identificar qual a situação, se rural ou urbana, de uma determinada área do município em uma data específica.

O principal objetivo da função de análise é auxiliar o entendimento dos processos que ocorrem em um contexto geográfico através da observação de uma sequência de eventos. As aplicações espaço-temporais devem incluir referências específicas às mudanças ocorridas em uma região, melhorando desta forma a capacidade analítica de um SIG. A análise pode ser estatística, quando os dados são analisados com o intuito de determinar tendências, padrões, semelhanças e divergências, ou comparativa, quando os dados empíricos são confrontados com os dados resultantes de modelos teóricos para identificar divergências ou semelhanças

entre os mesmos. A análise também pode ser preditiva, quando a partir do conhecimento da existência de um processo e do entendimento do seu funcionamento é possível realizar simulações de situações futuras (LANGRAN, 1992).

Comumente a atualização de dados é feita substituindo-se os dados antigos pelos novos. Numa aplicação espaço-temporal em SIG as informações antigas devem ser mantidas como fonte de referência (LANGRAN, 1992).

O papel do controle de qualidade, ou integridade dos dados, é evitar que sejam introduzidos dados inconsistentes no banco de dados. Os erros podem ser inerentes ou operacionais. O erro inerente deriva da fonte de dados ou é introduzido durante o processo de levantamento dos dados. O erro operacional é introduzido durante a manipulação dos dados devido à falhas nos processos de registro e interpretação (LANGRAN, 1992).

Uma aplicação espaço-temporal em SIG pode disponibilizar algumas facilidades de gerenciamento de sistemas, como por exemplo, agendamento de tarefas. Desta forma, tarefas previamente agendadas notificam os administradores da necessidade de realizar uma determinada ação. Por exemplo, conhecendo-se a frequência com que as lâmpadas utilizadas na iluminação pública queimam, o sistema poderia, através de uma função, avisar o administrador de que é necessário realizar a troca das lâmpadas (LANGRAN, 1992).

Uma aplicação espaço-temporal em SIG deve ser capaz de produzir mapas e tabelas para responder questões temporais. A apresentação de dados em uma aplicação deste tipo pode ser: em tempo real, animações, mapas estáticos, e tabelas. A apresentação de dados em tempo real é usada para aplicações de navegação eletrônica como monitoramento de veículos por satélite ou para visualização de dados observados no campo, como, por exemplo, a quantidade de chuva em uma determinada região num sistema de alerta de risco de enchentes. As animações podem se usadas para visualizar como as características de uma região se alteraram ao longo

do tempo, para mostrar, por exemplo, o crescimento urbano em uma determinada região ou os dados de satélites meteorológicos. Os mapas estáticos também são bastante importantes pela portabilidade, anotação e contemplação. Uma série temporal de mapas pode ser usada para mostrar o desenvolvimento e funcionamento de processos, e a evolução passada e futura de uma determinada região ou fenômeno. Finalmente, informações temporais não espaciais podem ser descritas em tabelas, por exemplo, as mudanças dos atributos de uma feição ao longo do tempo, e informações espaciais não temporais podem ser descritas por meio do desenho tradicional de mapas, como um mapa de uma determinada região em um momento específico (LANGRAN, 1992).

A partir da realização de consultas e análises, uma aplicação espaço temporal deve possibilitar que se determine se existe um padrão temporal nas mudanças, quais são as tendências aparentes e quais processos causaram as mudanças. As consultas que uma aplicação espaço-temporal em SIG deve ser capaz de responder são as seguintes (LANGRAN, 1992; YUAN, 2001):

- Onde e quando ocorreram as mudanças?
- Que tipo de mudanças ocorreu?
- Qual é a periodicidade da mudança, se existir?
- Qual o tempo de duração de um evento?
- Quantos eventos ocorreram em um determinado local, entre duas datas distintas?
- Qual é a distribuição espacial de um fenômeno específico em uma determinada data?
- Quais elementos mudaram ou estão mudando durante um intervalo especificado?

2.5. PROJETO DE BANCO DE DADOS

Um banco de dados é um conjunto de dados que representam informações sobre um domínio específico. Um sistema de gerenciamento de bancos de dados (SGBD) consiste de uma coleção de dados inter-relacionados e de um conjunto de programas para acessá-los (KORTH e SILBERSCHATZ, 1995).

No contexto de projeto e definição de banco de dados (geográficos ou tradicionais), a análise é a ação de entender e descrever o que o usuário necessita para o seu banco de dados. A modelagem de dados é a base para análise e projeto de banco de dados, pois permite documentar e comunicar a realidade de maneira consistente e coerente por meio de modelos (BEDÁRD, 1999).

Existem vários métodos para auxiliar na realização da modelagem do banco de dados. O uso destes métodos permite uma comunicação mais eficiente entre o usuário e o desenvolvedor do banco de dados. Um método formal de análise e projeto de sistemas é composto por um conjunto de regras e diretrizes para capturar a semântica da realidade do usuário e construir um banco de dados para representá-la (BEDÁRD, 1999).

Dentro desse contexto um modelo de dados é uma coleção de ferramentas conceituais para descrição de dados, relacionamentos de dados, semântica de dados e restrições de consistência (KORTH e SILBERSCHATZ, 1995). A semântica dos dados descreve o significado de objetos ou conceitos no mundo físico ou abstrato. A descrição dos dados representa os conceitos e objetos pertencentes ao domínio, e suas propriedades, enquanto os relacionamentos representam as ligações entre esses objetos ou conceitos. As restrições descrevem as regras que limitam a ocorrência de dados válidos naquele universo.

Os modelos de dados podem ser conceituais ou lógicos. Os modelos conceituais capturam a semântica dos dados e representam a realidade em um alto nível de abstração⁴, através de notações gráficas, sem se preocupar com os aspectos de implementação. Os modelos lógicos, por sua vez, são usados para especificar a estrutura do banco de dados em um nível de abstração mais próximo das estruturas de armazenamento de dados, através de tabelas e registros (KORTH e SILBERSCHATZ, 1995).

Dois dos modelos conceituais mais difundidos são o modelo entidade-relacionamento e o modelo orientado a objeto. O modelo entidade-relacionamento baseia-se numa percepção de que o mundo real é composto por uma coleção de objetos denominados *entidades* e os relacionamentos entre esses objetos. Uma entidade é um objeto distinguível de outro objeto por um conjunto específico de atributos. Um relacionamento é uma associação entre várias entidades. O modelo orientado a objeto também é baseado num conjunto de objetos que possuem comportamento e métodos específicos e podem ser agrupados em classes (KORTH e SILBERSCHATZ, 1995).

Os modelos lógicos mais conhecidos são os modelos relacional, de rede e hierárquico. O modelo de rede representa os dados por meio de coleções de registros, e os relacionamentos entre eles por ligações que podem ser vistas como ponteiros. Os registros no banco de dados são organizados como coleções de grafos arbitrários. O modelo hierárquico é similar ao modelo de redes, também representando os dados e relacionamentos por meio de registros e ligações. A diferença é que no modelo hierárquico os registros são organizados como coleções de árvores em vez de grafos arbitrários como no modelo de redes. O modelo relacional representa os dados e relacionamentos entre eles através de um conjunto de tabelas, cada uma contendo um número de colunas com nomes únicos. O modelo relacional difere dos demais por não

⁴ Abstração é o processo mental que consiste em escolher ou isolar um aspecto determinado de um estado de coisas relativamente complexo, a fim de simplificar a sua avaliação, classificação ou para permitir a comunicação do mesmo (HOUAISS, 2001).

utilizar ponteiros para representar os relacionamentos entre registros, e sim, relacionar os registros a partir dos valores que eles contém (KORTH e SILBERSCHATZ, 1995).

2.5.1 Modelo Entidade-Relacionamento

O modelo entidade-relacionamento (E-R) é baseado numa percepção do mundo real que consiste de uma coleção de objetos básicos chamados *entidades*, e de relacionamentos entre esses objetos. Uma *entidade* é um objeto que é distinguível de outro objeto por um conjunto específico de atributos. Um *relacionamento* é uma associação entre várias entidades. Considere-se o caso de uma conta corrente em um banco, os atributos *número* e *saldo* descrevem uma conta em particular, e um relacionamento *ContaCliente* associa um cliente a cada conta que ele possui. O conjunto de todas as entidades de um mesmo tipo e o conjunto de relacionamento do mesmo tipo são denominados de *conjuntos de entidades* e *conjuntos de relacionamentos*, respectivamente (KORTH e SILBERSCHATZ, 1995).

Além das entidades e relacionamentos o modelo E-R representa certas restrições com as quais os conteúdos dos bancos de dados precisam estar de acordo. Uma restrição é o *mapeamento de cardinalidade* que expressa o número de entidades ao qual outra entidade pode estar associada via um conjunto de relacionamentos. A cardinalidade do mapeamento pode ser expressa da seguinte maneira (KORTH e SILBERSCHATZ, 1995):

- Um para um (1:1): significa que uma ocorrência da entidade *A* está associada no máximo a uma ocorrência da entidade *B*, e vice-versa;
- Um para muitos (1:N): significa que uma ocorrência da entidade *A* está associada a qualquer número de ocorrências da entidade *B*, porém uma ocorrência da entidade *B* esta associada a apenas uma ocorrência da entidade *A*.

- Muitos para muitos (M:N): significa que uma ocorrência da entidade *A* está associada a qualquer número de ocorrências da entidade *B*, e uma ocorrência da entidade *B* está associada a qualquer número de ocorrências da entidade *A*.

Outra restrição importante é a *dependência de existência*. Se a existência da entidade *X* depende da existência da entidade *Y*, significa que se *Y* for eliminado, *X* também o será. A entidade *Y* é chamada de *entidade dominante* e *X* é chamada de *entidade dependente* (KORTH e SILBERSCHATZ, 1995).

A *generalização* é um relacionamento de conteúdo existente entre um conjunto de entidades de *nível superior* e entidades de *nível inferior*. Por exemplo, *conta* é um conjunto de entidade de nível superior e *conta-poupança* e *conta-corrente* são conjuntos de entidade de nível inferior. A *conta-poupança* e *conta-corrente* são descritas por um conjunto de atributos que inclui todos os atributos de *conta* mais alguns atributos adicionais (KORTH e SILBERSCHATZ, 1995).

A estrutura lógica geral de um banco de dados pode ser expressa graficamente por um *diagrama E-R*, que consiste nos seguintes componentes (KORTH e SILBERSCHATZ, 1995):

- a) Retângulos: representam conjuntos de entidades;
- b) Elipses: representam atributos;
- c) Losangos: representam relacionamentos entre conjuntos de entidades
- d) Linhas: ligam atributos a conjuntos de entidades e conjuntos de entidades a relacionamentos.

3. RECURSOS HÍDRICOS E QUALIDADE DA ÁGUA

A água é fundamental à vida, é insubstituível em diversas atividades humanas e define o desenvolvimento que uma região, país ou sociedade pode alcançar. De toda a água existente no planeta, 97,5% são águas salgadas que formam os oceanos, e apenas 2,5% são águas doces, sendo que a maior parte dessa água doce (68,7%) está armazenada nas calotas polares e geleiras. Apenas 0,27% do volume de água doce da Terra, que representa 0,007% do volume total, está contida em lagos e rios, que são as fontes mais comuns para abastecimento humano (ANEEL & ANA, 2001).

Com o acelerado crescimento populacional vem aumentando a demanda pela água, o que vem ocasionando problemas de escassez e conflitos entre usos e usuários (ANEEL & ANA, 2001). Segundo estimativas do *Population Reference Bureau* (1997) existe, atualmente, mais de 1 bilhão de pessoas sem suficiente disponibilidade de água para consumo doméstico e, em 30 anos, este número chegará a 5,5 bilhões. Segundo estimativas da OMM/UNESCO (1997), mais de 5 milhões de pessoas morrem anualmente de doenças vinculadas à água, seja pelo consumo de água contaminada ou pela inexistência de serviços sanitários adequados e falta de higiene.

A humanidade tem realizado esforços, desde o início de sua história, para satisfazer a demanda pela água mediante a construção de poços, barragens, açudes, aquedutos, sistemas de abastecimento, sistemas de drenagem, projetos de irrigação e outras estruturas (ANEEL & ANA, 2001). Apesar disto, segundo dados da OMM/UNESCO (1997), em 1995 aproximadamente 20% dos 5,7 bilhões de habitantes da Terra não dispunham de um sistema de abastecimento de água confiável e mais de 50 % não contavam com um sistema adequado de instalações sanitárias.

A demanda total de água no mundo no ano 2000, segundo dados estimativos, correspondeu a menos de 10% do volume total disponível (demanda 3.940 km³,

disponibilidade 42.600 km³ por ano). Isto demonstra que em nível global não há escassez hídrica, porém a má distribuição espacial e temporal dos recursos hídricos, aliados à distribuição populacional da terra, faz com que algumas áreas sofram permanentemente por falta d'água, quer seja em decorrência da baixa disponibilidade na região em dado momento ou por uma excessiva demanda de utilização destes recursos (ANEEL & ANA, 2001).

O Brasil possui uma situação privilegiada em relação à disponibilidade hídrica, segundo a ONU, 8% do estoque mundial de água doce está no Brasil. No entanto, este estoque não está distribuído de maneira uniforme pelo país, mais de 73% da água doce disponível encontra-se na bacia Amazônica, que é habitada por menos de 5% da população. A idéia de que a água é um recurso abundante deu suporte, durante muito tempo, à cultura do desperdício, e ao não comprometimento dos governos com relação à realização dos investimentos necessários para seu uso e proteção mais eficientes. Os problemas de escassez hídrica no Brasil são consequência da combinação do crescimento exagerado das demandas localizadas e da degradação da qualidade das águas, em função do aumento desordenado dos processos de urbanização, industrialização e expansão agrícola (ANEEL & ANA, 2001).

Ao longo de toda história da humanidade, o desenvolvimento econômico e a diversificação da sociedade resultaram em usos múltiplos e variados dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos. O aumento e a diversificação dos usos da água resultaram em uma multiplicidade de impactos, e geram conflitos em razão de suas finalidades diversas, as quais demandam quantidades e qualidades diferentes. Água para abastecimento público, hidroeletricidade, agricultura, transporte, recreação, turismo, disposição de resíduos, indústria, todos esses usos são conflitantes (TUNDISI, 2003).

3.1. USOS DA ÁGUA

A água sempre foi um recurso estratégico à sociedade. A sua escassez impõe dificuldades ao desenvolvimento, aumenta a tendência de doenças de veiculação hídrica, produz estresses econômicos e sociais e aumenta as desigualdades entre regiões e países (TUNDISI, 2003).

A água é um elemento necessário para quase todas as atividades humanas, os setores usuários dos recursos hídricos são os mais diversos, com aplicação para inúmeros fins (ANEEL & ANA, 2001). O uso e o consumo da água nas atividades humanas varia muito entre as diversas regiões. Fatores como o aumento populacional, crescimento econômico e desenvolvimento cultural determinam necessidades diversas. Os usos múltiplos da água, incluem (TUNDISI, 2003):

- a) manutenção das funções vitais dos seres vivos;
- b) irrigação agrícola;
- c) dessedentação de animais;
- d) abastecimento público para utilização doméstica: higiene pessoal, lavagem de roupas e utensílios, água para beber e cozinhar;
- e) disposição de resíduos;
- f) transporte e navegação;
- g) produção pesqueira comercial ou esportiva;
- h) cultivo de peixes, moluscos, crustáceos de água doce (aqüicultura);
- i) lavagem e purificação em mineração;
- j) resfriamento e plantas de lavagem, limpeza e descarga de materiais nas indústrias;
- k) geração de hidroeletricidade;
- l) usos estéticos: recreação, turismo e harmonia paisagística.

As diversas finalidades do uso da água demandam quantidades e qualidades diferentes (TUNDISI, 2003). O Quadro 3.1 apresenta os diferentes usos da água em km³ por continente.

QUADRO 3.1 – USOS MÚLTIPLOS DA ÁGUA POR CONTINENTE (km³) (1995)

REGIÕES	IRRIGAÇÃO	INDÚSTRIA	DOMÉSTICO/MUNICIPAL
África	127,7	7,3	10,2
Ásia	1.388,8	147,0	98,0
Austrália – Oceania	5,7	0,3	10,7
Europa	141,1	250,4	63,7
Américas do Norte e Central	248,1	235,5	54,4
América do Sul	62,7	24,4	19,1
Total mundial	2.045,1	648,9	256,5
Porcentagem do total mundial	68,3	21,1	8,2

FONTE: TUNDISI, 2003 adaptado de RAVEN *et al.* 1998

O uso da água pode ter caráter consuntivo, quando a água é captada do seu curso natural e somente parte dela retorna ao curso normal do rio, ou não consuntivo, onde toda a água captada retorna ao curso d'água de origem. Os usos consuntivos da água são: abastecimento público, abastecimento industrial e irrigação. Os usos não consuntivos são: geração de energia elétrica, navegação, recreação e harmonia paisagística, pesca, diluição e assimilação de esgoto e resíduos líquidos. Os usos consuntivos devem ser considerados para a elaboração do balanço hídrico entre a disponibilidade e a demanda da água (ANEEL & ANA, 2001).

O Quadro 3.2, apresenta uma classificação sistemática dos usos da água, explicitando algumas características:

- a) a existência ou não de derivação de águas do seu curso natural;
- b) a finalidade e os tipos de uso;
- c) as perdas consuntivas da água;
- d) os requisitos de qualidade exigidos para cada uso, e;
- e) os efeitos da utilização, especialmente as alterações de qualidade.

QUADRO 3.2 – USOS DA ÁGUA

FORMA	FINALIDADE	TIPOS DE USO	USO CONSUNTIVO	REQUISITOS DE QUALIDADE	EFEITOS NAS ÁGUAS
Com derivação de águas	Abastecimento urbano	Abastecimento doméstico, industrial, comercial e público	Baixo, de 10%, sem contar as perdas nas redes	Altos ou médios, influenciando no custo do tratamento	Poluição orgânica e bacteriológica
	Abastecimento industrial	Sanitário, de processo, incorporação ao produto, refrigeração e geração de vapor	Médio, de 20%, variando com o tipo de uso e de indústria	Médios, variando com o tipo de uso	Poluição orgânica, substâncias tóxicas, elevação de temperatura
	Irrigação	Irrigação artificial de culturas agrícolas segundo diversos métodos	Alto, de 90%	Médios, dependendo do tipo de cultura	Carreamento de agrotóxicos e fertilizantes
	Abastecimento	Doméstico ou para dessedentação de animais	Baixo, de 10%	Médios	Alterações na qualidade com efeitos difusos
	Aqüicultura	Estações de piscicultura e outras	Baixo, de 10%	Médios	Carreamento de matéria orgânica
Sem derivação de águas	Geração hidrelétrica	Acionamento de turbinas hidráulicas	Perdas por evaporação do reservatório	Baixos	Alterações no regime e na qualidade das águas
	Navegação fluvial	Manutenção de calados mínimos e eclusas	Não há	Baixos	Lançamento de óleos e combustíveis
	Recreação, lazer, harmonia paisagística	Lazer contemplativo	Não há	Altos, especialmente recreação de contato primário	Não há
	Pesca	Com fins comerciais de espécies naturais ou introduzidas através de estações de piscicultura	Não há	Altos, nos corpos de água, correntes, lagos ou reservatórios artificiais	Alterações na qualidade após mortandade de peixes
	Assimilação de esgotos	Diluição, autodepuração e transporte de esgotos urbanos e industriais	Não há	Não há	Poluição orgânica, física, química e bacteriológica
	Uso de preservação	Vazões para assegurar o equilíbrio ecológico	Não há	Médios	Melhoria da qualidade da água
FONTE: ANEEL & ANA, 2001 adaptado de Barth, 1987					

3.2. QUALIDADE DA ÁGUA

Muitas atividades humanas têm consequência adversa sobre os recursos hídricos. Quando as atividades humanas causam diminuição na qualidade da água diz-se que está poluída (HEM, 1989). A quantidade e a natureza dos constituintes presentes na água variam em função do solo, das condições climáticas e do grau de poluição que lhes é conferido, especialmente pelos despejos municipais e industriais. Uma análise completa de uma água natural indicaria a presença de mais de cinquenta constituintes nela dissolvidos ou em suspensão. Esses elementos, em geral são sólidos dissolvidos ionizados, gases, compostos orgânicos, matéria em suspensão incluindo microorganismos e matéria coloidal (ANEEL & ANA, 2001). O fato de que uma substância esteja presente na água, não significa, necessariamente, que a água esteja poluída, pois vários outros aspectos devem ser considerados, como nível de concentração e características da substância (HEM, 1989).

Durante o ciclo hidrológico, a água sofre alterações em sua qualidade. Isso ocorre nas condições naturais, em razão das inter-relações dos componentes do sistema do meio ambiente e quando os recursos hídricos são influenciados por outros fatores, como o uso para suprimento das demandas dos núcleos urbanos, das indústrias, da agricultura e das alterações do solo, urbano e rural (ANEEL & ANA, 2001).

Os problemas relativos à qualidade da água são decorrentes da contaminação gerada pela disposição inadequada de resíduos líquidos e sólidos, de natureza doméstica e industrial; alterações provocadas por empreendimentos para geração de energia, como resfriamento de águas de termoeletricas, além de práticas agrícolas e criação de animais (LIMA, 2001). Os recursos hídricos têm capacidade de diluir e assimilar esgotos e resíduos mediante processos físicos, químicos e bacteriológicos, que proporcionam a autodepuração. Essa capacidade, no entanto, é limitada em face

das características hidráulicas, morfológicas, climatológicas e biológicas, envolvendo aspectos de quantidade e qualidade de recursos hídricos existentes, portanto, a qualidade e quantidade de água são aspectos indissociáveis para o gerenciamento dos recursos hídricos (ANEEL & ANA, 2001).

O tratamento prévio de esgotos urbanos e industriais é fundamental para a conservação dos recursos hídricos em padrões de qualidade compatíveis com a utilização para os mais diversos fins. Há substâncias que não se autodepuram e causam poluição cumulativa das águas, quando são lançadas sem tratamento nos rios ou lagos, causam sérios riscos ao homem, à fauna e à flora (ANEEL & ANA, 2001).

Eliminar completamente a poluição é uma meta irrealista pois o aumento da população e o desenvolvimento econômico das sociedades implica na realização de atividades potencialmente poluidoras. É comum o estabelecimento de padrões de tolerância de concentração das substâncias na água, de acordo com o uso que se pretende fazer dessas águas. Água para abastecimento e consumo humano, por exemplo, tem padrões bem mais restritos do que para outros usos, como agrícola ou industrial, além de não conter substâncias nocivas à saúde ela deve estar livre de odores, gosto, cor e turbidez. Neste contexto, pode-se definir *poluição* por um nível de contaminação que a inviabiliza para usos pré-determinados (HEM, 1989).

No Brasil, a resolução CONAMA nº 20/86 classifica os recursos hídricos em 9 classes, segundo seus usos preponderantes e estabelece o nível de qualidade (classe) a ser alcançado e/ou mantido em um segmento de corpo d'água ao longo do tempo. O termo gerenciamento de qualidade da água implica, portanto, no uso e desenvolvimento dos recursos hídricos de maneira que mantenha a qualidade da água nos níveis estabelecidos para os usos pré-definidos.

3.2.1 Fontes de Poluição da Água

As duas formas em que as fontes poluentes podem atingir um corpo de água são: pontual e difusa. Uma fonte é dita pontual quando se restringe a um simples ponto de lançamento de modo que é possível determinar a sua localização. Efluentes de Estações de Tratamento de Esgotos, descargas indústrias, efluentes de aterros sanitários são fontes pontuais. As fontes difusas caracterizam-se, por sua vez, por estar distribuídas ao longo da superfície do solo, apresentando múltiplos pontos de descarga resultantes do escoamento em áreas urbanas e agrícolas, e ocorrem durante os períodos de chuva (HEM, 1989). Também são ditas cargas não pontuais as cargas que não apresentam um ponto de lançamento específico, sendo despejadas ao longo das margens dos rios ou lagos (MENESES e TUCCI, 2003). A Figura 3.1, apresentada a seguir, ilustra as fontes de poluição dos rios.

FIGURA 3.1 – FONTES DE POLUIÇÃO DOS RIOS



FONTE: LIMA (2001)

Algumas origens de fonte difusa de poluição em meio urbano são o lixo orgânico acumulado nas ruas, os resíduos orgânicos de animais, os restos provenientes de construção, as partículas de pneu e de asfalto e outros resíduos de veículos automotores, as ligações incorretas ou clandestinas de esgoto doméstico na rede de drenagem pluvial (PORTO, 1995). No meio rural, as origens de fontes difusas de poluição são as práticas agrícolas, e o uso de fertilizantes e pesticidas (HEM, 1989).

A distinção entre os tipos de fontes poluentes na prática nem sempre é bastante clara, é comum, por, exemplo, cargas difusas em bacias urbanas estarem associadas à parcela de cargas de esgotos domésticos, em decorrência da inadequação operacional de sistemas de coleta e do lançamento de esgoto na rede de drenagem pluvial (MENESES e TUCCI, 2003). Em geral, as fontes de poluição pontuais podem ser reduzidas ou eliminadas através de tratamento apropriado para posterior lançamento em um corpo receptor. As fontes de poluição difusas têm grande impacto na qualidade da água e o controle e redução dessas fontes é bem mais complexo pois requerem mudanças nas práticas de uso da terra (HEM, 1989).

A qualidade da água é medida através da análise de parâmetros químicos. A existência de determinadas substâncias na água pode ser relacionada aos diversos tipos de poluição. Os poluentes são classificados em matéria orgânica, patogênico, nutrientes, metais pesados e substâncias tóxicas (SANTOS *et al.* 2001).

A matéria orgânica é definida como qualquer composto que pode ser oxidado no corpo receptor com consumo do oxigênio molecular, o que causa deficiência de oxigênio nos corpos d'água, ameaçando a sobrevivência da vida aquática. Os nutrientes, nitrogênio e fósforo, dão suporte à cadeia alimentar provocando o excessivo crescimento de algas nos lagos, reservatórios, rios e mares. Os organismos patogênicos são responsáveis pela veiculação de doenças hídricas. Metais pesados e substâncias tóxicas são nocivos ao ser humano e ao meio ambiente (SANTOS *et al.*, 2001).

O Quadro 3.3 relaciona os tipos de poluentes com as fontes de poluição, os impactos causados pelos poluentes e os parâmetros de qualidade indicadores destes poluentes.

QUADRO 3.3– PRINCIPAIS POLUENTES POR FONTES DE POLUIÇÃO

POLUIÇÃO	FONTE	IMPACTO	PARÂMETROS INDICADORES
Matéria orgânica	Áreas agrícolas, pecuária, efluentes doméstico e industrial	Redução de Oxigênio Dissolvido (OD), mortandade de peixes	Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Oxigênio Dissolvido (OD)
Patogênico	Esgoto bruto ou parcialmente tratado, excremento de animais	Transmissão de doenças como cólera, disenteria e esquistossomose e proibição de usos nobres da água	Coliformes fecais e totais
Nutrientes	Agricultura, pecuária, esgoto doméstico e industrial	Proliferação excessiva de algas resultando em redução de OD, liberação de toxinas do sedimento; redução de diversidade da comunidade de invertebrados e vertebrados; mortandade de peixe; risco de redução da capacidade de transporte de oxigênio no sangue de recém-nascidos	Nitrogênio, Fósforo
Metais pesados	Descargas industriais, iodo de estações de tratamento de esgoto, efluente de minas de carvão, deposição atmosférica, aterro sanitário	Redução da população de peixes devido falha na reprodução; efeito letal nos invertebrados; diversos problemas à saúde humana como: disfunção nos rins, problemas nos ossos ou no sistema nervoso, dependendo do metal	Mercúrio, cádmio, Chumbo, Cromo, etc
Substâncias tóxicas	Escoamento superficial urbano e rural, descargas doméstica e industrial, infiltração	Crescimento e sobrevivência reduzidos de alevinos; doenças nos peixes; aumento do risco de câncer no cólon, rins e bexiga nos seres humanos	Pesticidas, Amônia

FONTE: SANTOS *et al* (2001)

3.2.2 Método para o Cálculo de Poluição Difusa (*Simple Method*)

Existem diversos estudos e métodos para a determinação da carga de poluentes resultante do escoamento em áreas urbanas e agrícolas durante os períodos de chuva. Um desses métodos é o Método Simples (*Simple Method*) proposto por SCHUELER (1987). Este método requer uma quantidade modesta de informações, que inclui a área de drenagem das sub-bacias, a cobertura do solo, as concentrações dos poluentes presentes no escoamento superficial e a média de precipitação anual (ou qualquer outro período definido).

Para a aplicação desse método, primeiramente é computado o escoamento superficial ocorrido no período definido, anual por exemplo. Em seguida, com base na concentração média do poluente de interesse, são calculadas as cargas como o produto dessa concentração pelo nível de escoamento, dessa forma:

$$Q = (P.Pj.Cs).A$$

$$L = Q.C$$

Onde:

Q é o volume de escoamento superficial anual;

L é a carga de escoamento superficial urbano;

P é a altura de precipitação no intervalo de tempo considerado

Pj é a fração dos eventos de chuva que produzem escoamento superficial

Cs é o coeficiente médio de escoamento

C é a concentração média ponderada pela vazão

A é a área

As concentrações dos diferentes poluentes podem ser estimadas a partir de dados regionais para cada uso do solo, residencial, comercial e industrial. O Método Simples é mais apropriado para determinação e comparação de cargas entre os diferentes usos de solo (SCHUELER, 1987). Esse método foi aplicado por MENESES e TUCCI (2003) na bacia do Arroio moinho em Porto Alegre (RS).

3.2.3 Parâmetros da Qualidade da Água e Padrões Ambientais

A seguir serão descritos os principais parâmetros de qualidade da água e os limites estabelecidos pela resolução CONAMA n° 20/86 para cada um deles.

OD – Oxigênio Dissolvido

A determinação da concentração de OD nos rios é um dos testes mais importantes, pois indica a deficiência de oxigênio nos corpos d'água, que está diretamente relacionada com a manutenção da fauna e flora aquática. Num curso d'água sem poluição, a [OD] em equilíbrio com o oxigênio da atmosfera pode variar na faixa de 8-11 mg/l, dependendo da temperatura da água e da altitude. Algumas espécies de peixes já apresentam problemas respiratórios se a [OD] for menor ou igual a 5 mg/l, como as trutas, que requerem cerca de 7,5 mg/l, entretanto outras espécies mais resistentes, como carpas e cascudos, podem suportar até 3 mg/l (SUDERHSA, 1997). As concentrações mínimas definidas pela resolução CONAMA n° 20/86 para os rios de classe 1, 2, 3, e 4 são 6, 5, 4 e 2 mg/l respectivamente.

DBO₅ – Demanda Bioquímica de Oxigênio

A DBO₅ é um teste que avalia, indiretamente, a quantidade de matéria orgânica biodegradável presente numa amostra. A matéria orgânica presente num curso d'água, proporciona o desenvolvimento das populações de microorganismos que a utilizam como alimento. Esses microorganismos, assim como os seres superiores, utilizam o oxigênio no seu metabolismo, e como consequência, a [OD] diminui. O teste de DBO₅ mede a diminuição na [OD] da amostra, num período de cinco dias, sendo, portanto, uma medida indireta da matéria orgânica presente, através do consumo de oxigênio pelos microorganismos (SUDERHSA, 1997). Os rios de classe 1, 2 e 3 devem apresentar DBO₅ máxima de 3, 5 e 10 mg/l (resolução CONAMA n° 20/86).

DQO – Demanda Química de Oxigênio

É um teste que mede a quantidade de oxigênio consumida na oxidação da matéria orgânica utilizando-se um oxidante químico enérgico. Esta solução oxida tanto a matéria biodegradável quanto a não biodegradável, e por isso, a DQO é normalmente maior que a DBO₅ (SUDERHSA, 1997).

Coliformes Fecais

Os coliformes fecais representam um grupo de bactérias que vivem normalmente em grande número nos intestinos humanos e de animais de sangue quente. Sua presença num curso d'água pode estar relacionada com o lançamento de esgotos domésticos e excrementos de animais. Um grande número de microorganismo patogênicos, relacionados a doenças hidroveiculadas como a hepatite, a cólera, as disenterias, entre outras, pode também estar presente nos esgotos. Como seria impraticável fazer um teste específico para detectar a presença de cada um deles, utiliza-se o teste de coliformes como indicador geral da qualidade bacteriológica da água e sua presença a torna suspeita para consumo humano, sem tratamento (SUDERHSA, 1997). Os rios de classe 1, 2 e 3 devem ter concentrações máximas de coliformes fecais de 200, 1000 e 4000 NMP por 100m/l (resolução CONAMA n° 20/86), com exceção para uso de recreação de contato primário que deverá obedecer a resolução CONAMA 274/2000.

pH

O pH é um parâmetro que indica a acidez ($\text{pH} < 7$) ou a basicidade ($\text{pH} > 7$) de uma solução, e é função da concentração de íons-hidrogênio na água. Alterações no pH da água podem afetar a fauna e flora aquática, razão pela qual ele deve ser mantido na faixa entre 6 e 9. O pH neutro (7) não indica, necessariamente pureza da água, mas um equilíbrio entre substâncias ácidas e básicas (SUDERHSA, 1997).

Temperatura

O lançamento de efluentes industriais com temperatura elevada, provoca uma poluição térmica dos rios, com elevação de temperatura de suas águas, o que pode afetar a fauna e flora aquáticas. A temperatura da água pode influir no retardamento ou aceleração da atividade biológica, na absorção de oxigênio e precipitação de compostos (SUDERHSA, 1997).

Nitrogênio Total

O nitrogênio, um dos elementos mais importantes no metabolismo de ecossistemas aquáticos, possui uma química complexa, em virtude dos vários estágios que pode assumir e impactos que a mudança do estado de oxidação pode trazer sobre os organismos vivos. A presença de nitrogênio no meio aquático pode originar-se de diversas fontes, tais como: chuva, material orgânico e inorgânico de origem alóctane, de esgotos domésticos e industriais e da drenagem de áreas fertilizadas. O nitrogênio total é a soma de quatro espécies, que constituem a chamada série do nitrogênio: orgânico (presente em substâncias orgânicas como as proteínas), nitrogênio amoniacal (presente na amônia NH_3), nitrogênio nitrito (presente no íon NO_2) e nitrogênio nitrato (presente no íon NO_3) (SUDERHSA, 1997).

Na decomposição da matéria orgânica o nitrogênio se transforma em amônia. A uréia, presente na urina, também se decompõe rapidamente em amônia. Esta por sua vez é oxidada por bactérias aeróbicas a nitritos e posteriormente a nitratos. As diferentes formas dos compostos de nitrogênio encontradas no meio aquático podem ser utilizadas como indicadores da qualidade sanitárias das águas. A série do nitrogênio indica a idade da poluição. Um trecho de rio com predominância de nitrogênio orgânico e amoniacal, indica poluição recente por esgotos domésticos, por outro lado, se houver predominância de nitratos, o lançamento foi efetuado a montante do ponto analisado (SUDERHSA, 1997).

A amônia é um gás tóxico, que reage com a água, decompondo-se parcialmente em íons amônio que não são tóxicos. Em condições normais, a maior parte da amônia encontra-se em sua forma ionizada. O limite para amônia gasosa (não ionizada) é de 0,02 mg/l (resolução CONAMA n° 20/86), que corresponde a uma concentração de nitrogênio amoniacal total de 1,0 mg/l, para amostras com pH abaixo de 8 (SUDERHSA, 1997).

Em condições aeróbicas, o nitrito é rapidamente oxidado a nitrato, encontrando-se normalmente em pequenas concentrações, abaixo de 0,1 mg/l que é o limite recomendado para água potável. Os nitratos, em concentrações acima de 10mg/l, tornam a água inadequada para consumo humano (resolução CONAMA n° 20/86).

Outro aspecto importante do nitrogênio é que ele é um dos componentes dos fertilizantes aplicados em solos agrícolas. Quando substâncias nitrogenadas alcançam os rios, através do lançamento de esgotos domésticos e industriais, ou de escoamento em áreas cultivadas, provocam fertilização das águas desses rios, o que possibilita o desenvolvimento de microorganismos em lagos e reservatórios, onde a turbidez é baixa devido à sedimentação dos sólidos em suspensão, facilitando a penetração dos raios solares indispensáveis à fotossíntese das algas (SUDERHSA, 1997).

O desenvolvimento de algas traz uma série de problemas para a qualidade das águas, dentre eles a cor esverdeada, devido ao crescimento de algas. Quando as algas morrem, a decomposição de sua matéria orgânica reduz a concentração de OD. Além disso, elas provocam entupimentos nos filtros das estações de tratamento d'água e podem ainda segregar substâncias tóxicas que impossibilitam o consumo da água (SUDERHSA, 1997).

Fósforo Total

O fósforo total compreende o fósforo orgânico, presente em substâncias orgânicas, e o fósforo mineral, na forma de fosfatos. A importância do fósforo é que ele, juntamente com o nitrogênio, são os principais micronutrientes minerais que detonam o processo de eutrofização⁵ em rios, lagos e reservatórios. Os esgotos sanitários e certos despejos indústrias são ricos em fósforo. Para prevenir os problemas de eutrofização foi estabelecido um limite bastante estrito para o fósforo total, de 0,025 mg/l (resolução CONAMA n° 20/86), que pode ser ultrapassado apenas pela poluição natural dos rios (SUDERHSA, 1997).

Turbidez

A turbidez é causada pela presença de partículas em suspensão grosseira e coloidal, que podem agravar a poluição. A turbidez limita a penetração de raios solares, restringindo a realização de fotossíntese o que, por sua vez, reduz a reposição de oxigênio. Como consequência induz o corpo aquático ao processo de decomposição anaeróbica da matéria orgânica, o que causa maus odores (SUDERHSA, 1997). A resolução CONAMA n° 20/86, estabelece que os rios de classe 1, 2 e 3 devem ter turbidez abaixo de 40, 100 e 100 NTU, respectivamente.

Sólidos Totais

A quantidade e a natureza da matéria dissolvida e não dissolvida que ocorre no meio líquido varia grandemente. Nas águas potáveis, a maior parte da matéria está na forma dissolvida e consiste principalmente de sais inorgânicos, pequenas

⁵ Eutrofização: processo desencadeado pelo aumento de suprimento de nitrogênio e fósforo de um sistema aquático, continental, estuário ou água costeira a partir de fontes pontuais e não pontuais, provocando um desequilíbrio no ecossistema. A eutrofização geralmente é acompanhada de aumento de biomassa, hipolímnio anóxico e crescimento anormal de cianobactérias. Eutrofização cultural é resultante da ação humana. Eutrofização natural ocorre naturalmente (TUNDISI, 2003).

quantidades de matéria orgânica e gases dissolvidos (SUDERHSA, 1997). O conteúdo dos sólidos totais geralmente varia de 20 a 1000 mg/l e o limite estabelecido pela resolução CONAMA n° 20/86 é de 500 mg/l.

Condutividade

É um teste que mede a capacidade da amostra de ser atravessada por uma corrente elétrica, indicando a salinidade da água, que é um parâmetro importante na utilização da água para irrigação. Embora as diversas culturas tenham sensibilidades diferentes à salinidade, um valor máximo de condutividade de 750mS/cm, que corresponde, aproximadamente, a uma concentração de sólidos dissolvidos de 500 mg/l, é considerado seguro para fins de irrigação (SUDERHSA, 1997).

Substâncias tóxicas

Compreendem um grande número de substâncias que são de importância fundamental na utilização da água para abastecimento público, irrigação, dessedentação de animais, entre outros. Os fenóis reagem com o cloro adicionado nas estações de tratamento d'água, formando os clorofenóis, que dão gosto à água e são potencialmente cancerígenos, mesmo em baixas concentrações (SUDERHSA, 1997). Por essa razão a concentração máxima de fenóis, permitida em águas destinadas ao abastecimento público é de 0,001 mg/l. Com relação aos metais pesados, mercúrio, cádmio e chumbo as concentrações máximas permitidas são 0,0002mg/l, 0,001mg/l e 0,03mg/l respectivamente (resolução CONAMA n° 20/86).

3.3. O MODELO QUAL2E DE QUALIDADE DA ÁGUA

Modelo matemático é o processo de transcrever conceitos físicos e biológicos de qualquer sistema para um conjunto de equações matemáticas. Portanto, modelos matemáticos são técnicas que permitem representar propostas alternativas e simular condições reais, que poderiam ocorrer dentro de uma faixa de incertezas, inerentes ao conhecimento científico (TUCCI, 1998).

Os modelos matemáticos têm sido largamente utilizados tanto para atender aos objetivos de controle de qualidade da água e de simulações decorrentes do estado de ocupação da bacia, mas também, para prognosticar o impacto decorrente da implantação de novos empreendimentos. Um dos modelos mais utilizados na simulação da qualidade da água de cursos de água é o QUAL2E (CHAPRA, 1997).

O modelo QUAL2E foi implementado em um programa, de domínio público, pela EPA-USA (Environmental Protection Agency). Este modelo tem sido largamente utilizado no estudo de alocação de lançamentos de resíduos em rios. O modelo é flexível, e permite a simulação de múltiplos lançamentos pontuais e não pontuais, incrementos positivos e negativos de vazão para cada trecho, retiradas, contribuição de afluentes, e estruturas hidráulicas dentro dos rios. Além disso, o modelo é capaz de calcular a vazão incremental necessária no curso da água principal a fim de que um nível mínimo de OD seja mantido em todos os pontos do rio (LINFELD e BARNWEL JR, 1987).

A seguir são listados alguns exemplos de aplicação do modelo QUAL2E no Brasil, no estado do Paraná e na área de estudo deste projeto:

- a) O projeto “Avaliação de Benefício-Custo de Medidas de Controle de Cheias e Despoluição Urbana – Estudo de caso da Bacia do Rio Barigüi” (PROJETO BARIGÜI, 2003), utilizou o QUAL2E para determinar o

impacto da instalação de estações de tratamento de esgoto na bacia do rio Barigüi.

- b) SILVA (1998) aplicou o QUAL2E para avaliar o impacto causado pela implantação da Usina Hidrelétrica de Salto Caxias no Rio Iguaçu, no Estado do Paraná.
- c) LIMA (2001) utilizou o QUAL2E como uma das ferramentas da modelagem integrada para gestão da qualidade da água na bacia do Rio Cuiabá. O QUAL2E foi utilizado para avaliar a situação atual e gerar cenários futuros para os anos de 2005 e 2010 para os parâmetros DBO e coliformes fecais.
- d) VASCONCELOS NETO (2003) aplicou o QUAL2E no Rio Barigüi, como ferramenta para gestão de bacias urbanas. Foram simulados os parâmetros DBO, fósforo orgânico, nitrogênio orgânico e coliformes fecais.
- e) BIZZONI (2000) fez uma comparação do desempenho dos modelos QUAL2E e Mike 11 na região do Alto Iguaçu, Paraná.

Os modelos matemáticos de qualidade da água procuram descrever as mudanças espaciais e temporais dos constituintes a serem simulados. Os processos de transformação que ocorrem no copo hídrico são função das condições hidráulicas, químicas e biológicas do meio e do constituinte. Embora esses processos sejam bastante complexos e ainda não perfeitamente equacionados, os modelos disponíveis conseguem englobá-los de forma simplificada (VASCONCELOS NETO, 2003).

A seguir são apresentados alguns conceitos básicos para melhor entendimento do modelo QUAL2E (CHAPRA, 1997):

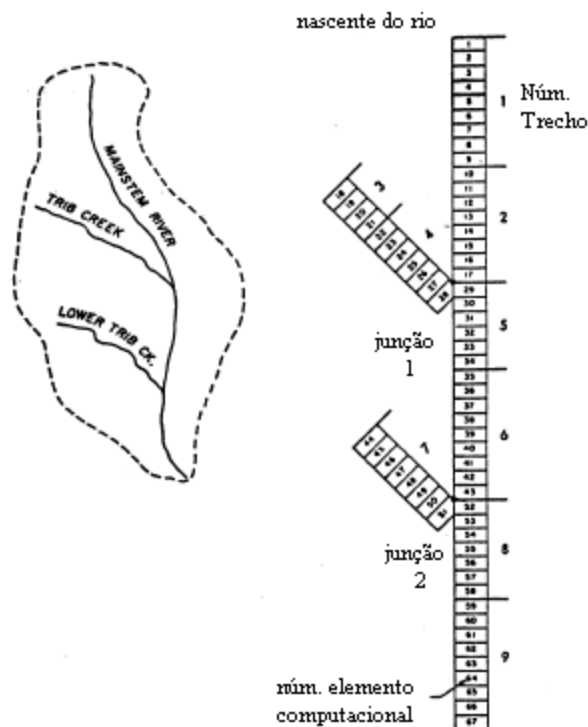
- constituinte: é qualquer substância, conservativa ou não, misturada ao meio fluído e que apresenta uma variabilidade espacial e temporal de sua

concentração;

- constituinte conservativo: é aquele cuja distribuição espacial e temporal não é afetada por reações com outros constituintes ou com o meio, só sendo afetado por processos físicos de transporte;
- constituinte não conservativo: aqueles cuja distribuição espacial e temporal é afetada por reações com outros constituintes ou com o meio;
- advecção: transporte provocado pelo movimento unidirecional do fluxo da água, não alterando a identidade da substância transportada;
- advecção diferenciada: transporte de partículas de fluido num campo de escoamento com significativos gradientes espaciais de velocidade onde as camadas adjacentes de um fluido apresentam deslocamentos relativos entre si;
- difusão: se refere ao transporte da massa devido ao movimento aleatório da água. Descreve o movimento da substância de um local mais concentrado para outro menos concentrado, minimizando a gradiente de concentração. A difusão pode ser molecular (movimento aleatório das moléculas) ou turbulenta (movimento devido a turbilhões);
- dispersão: é o espalhamento de partículas devido ao efeito combinado da advecção diferenciada e da difusão, molecular ou turbulenta;
- mistura: espalhamento do constituinte no corpo receptor, resultante de uma ação global envolvendo a concentração de quaisquer processos que causem este espalhamento.

O QUAL2E é um modelo numérico unidimensional para simulação da qualidade da água de um rio. O modelo divide o rio em trechos com propriedades hidrogeométricas (declividade, seção transversal do canal, rugosidade, etc.) uniformes. Cada trecho é sub-dividido em elementos computacionais (unidade de cálculo do QUAL2E) de mesmo comprimento, conforme ilustrado na Figura 3.2.

FIGURA 3.2 – REPRESENTAÇÃO DO RIO NO MODELO QUAL2E



Fonte: Adaptado de LINFIELD e BARNWEL, 1987.

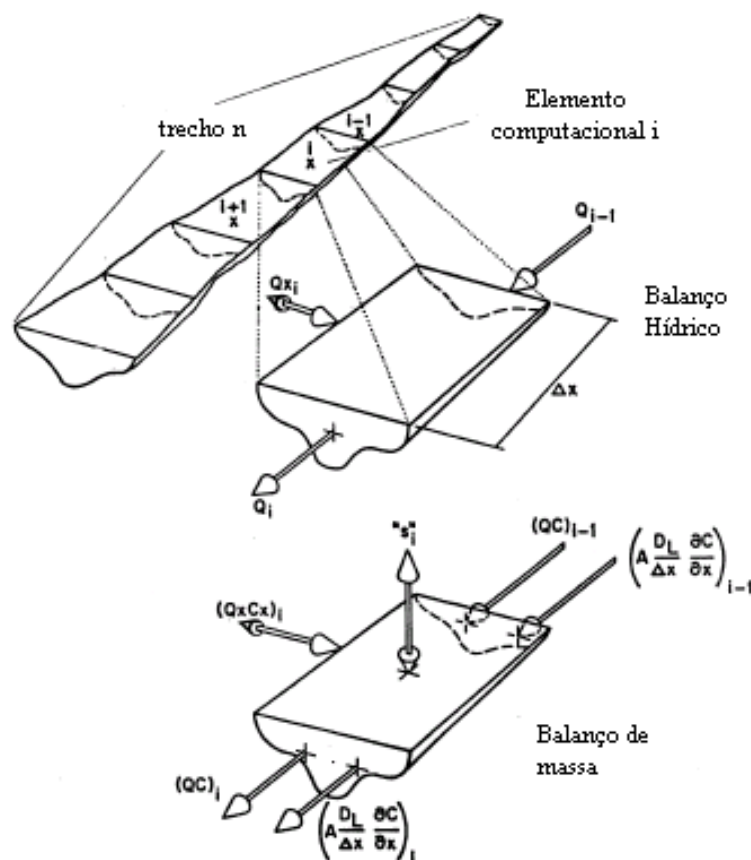
Para cada elemento computacional é executado um balanço hídrico e dos constituintes a serem simulados. Considera-se que os elementos computacionais são reatores de mistura completa, ligados sequencialmente um ao outro via mecanismo de transporte, cuja sucessão permite representar a evolução da qualidade da água ao longo do rio. Existem sete tipos diferentes de elementos computacionais:

- elemento de cabeceira: início do rio principal e de cada um dos afluentes;
- elemento a montante de junção: designa um elemento no curso principal a montante de uma junção;
- elemento de junção: recebe um afluente;
- elemento de entrada: representa a entrada de cargas poluentes ou afluentes não simulados no rio;
- elemento de retirada: designa um decréscimo de vazão, água retirada do rio através de captações, sumidouros, dentre outros;

- último elemento do sistema: identifica o último elemento computacional no sistema de rios (limite à jusante) e só existe um;
- elemento padrão: é o que não se enquadra em nenhum dos outros.

A equação do modelo QUAL2E é a de transporte de massa unidimensional com integração numérica espaço-temporal, cuja solução é obtida pelo método das diferenças finitas, através de um esquema implícito de regressão, que é o método de resolução numérica das equações diferenciais. Essa equação inclui os efeitos da advecção, dispersão, diluição, reações e interações entre os constituintes, entradas e retiradas de água. A Figura 3.3 mostra um trecho do rio dividido em elementos computacionais i . Para cada elemento i um balanço hidrológico é escrito em termos de vazão de montante para jusante Q_{i-1} , fontes externas Q_{xi} e vazão de jusante Q_i .

FIGURA 3.3 - DISCRETIZAÇÃO DO RIO NO MODELO QUAL2E



Fonte: Adaptado de LINFIELD e BARNWEL (1987).

O modelo é aplicado para sistema dentríticos que são bem misturados. O transporte advectivo-difusivo é significativo na direção do fluxo. A vazão que atravessa o sistema é constante no tempo e uniforme dentro de cada trecho, mas a vazão e as características hidráulicas podem variar de um trecho para outro.

O modelo é operado em regime permanente ou em regime dinâmico. Quando operado em regime permanente, não existe variação temporal de estado no sistema, sendo neste caso utilizado para estudo do impacto dos despejos (magnitude, qualidade e localização) na qualidade da água do rio. Na forma dinâmica, permite o estudo dos efeitos das variações diurnas dos dados meteorológicos na qualidade da água (oxigênio dissolvido e temperatura) e das variações do oxigênio dissolvido, devido ao crescimento e respiração das algas.

O QUAL2E permite simulações de um total de 15 parâmetros de qualidade da água: Oxigênio Dissolvido (OD); Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO); Temperatura; Algas (clorofila a); Nitrogênio Total (Nitrogênio orgânico, Amônia, Nitrito, Nitrato); Fósforo Total – orgânico e inorgânico (dissolvido); Coliforme Fecal; um constituinte não conservativo arbitrado; e três constituintes conservativos arbitrados.

O programa é escrito em linguagem ANSI FORTRAN 77, e permite que sejam feitas modificações na sua estrutura.

3.3.1 Modelagem da Qualidade da Água Utilizando o QUAL2E

O primeiro passo na modelagem de um rio com o QUAL2E é subdividir o rio em trechos que apresentem características hidráulicas uniformes. Cada trecho é, então, dividido em elementos computacionais de mesmo comprimento.

As informações referentes às cargas de poluentes e as condições relativas à situação existente no rio são fornecidas ao modelo através de 4 tipos de dados:

- Situação nas nascentes: são as condições de qualidade na nascente do rio ou afluente no início da modelagem. Estas condições são necessárias para as equações de balanço de massa para o primeiro elemento computacional em cada trecho das nascentes.
- Entradas ou saídas pontuais: são informadas as cargas de poluição pontual (lixo, industrial, esgoto, etc.) e as retiradas resultantes de captações de água ou sumidouros. As fontes de descarga pontuais podem representar cargas poluidoras *in natura* ou tratadas. Se cargas *in natura* forem usadas, o efeito do tratamento pode ser simulado aplicando-se um removedor fractional específico para cada carga.
- Vazão incremental: o modelo tem a capacidade de tratar vazão adicionada ou removida uniformemente ao longo do trecho. O incremento total de vazão ao longo de um trecho é alocado igualmente a todos os elementos computacionais daquele trecho. Esta função pode ser usada para simular o efeito de entradas de fontes difusas de poluição no sistema ou o efeito das perdas do rio para o subsolo.
- Concentração nos limites da foz (opcional): o modelo tem a capacidade de incorporar na solução do algoritmo a concentração dos constituintes de qualidade da água nos limites a jusante do rio. Esta função é útil na modelagem de sistemas com grande dispersão nos trechos inferiores, como os estuários. Quando esta informação é fornecida a solução gerada pelo modelo será limitada por esta condição.

Os dados climatológicos locais são requeridos para a simulação de algas e temperatura. A simulação de temperatura requer valores de umidade do ar, pressão atmosférica, velocidade do vento e cobertura de nuvens. Os dados hidráulicos, os coeficientes de taxa de reação, as condições iniciais e as vazões incrementais são constantes para todos os elementos computacionais do trecho.

Se o modelo for operado em regime dinâmico os dados climatológicos devem ser fornecidos em intervalos de tempo regulares, e são aplicados uniformemente para toda a bacia. Já se o modelo for operado em regime permanente são requeridas as médias diárias dos dados climatológicos locais, podendo variar espacialmente pela bacia (por trecho).

Basicamente os dados que devem ser fornecidos para uma simulação com o modelo QUAL2E são os seguintes:

- configuração do rio (trechos);
- coeficientes definindo a relação das descargas de profundidade e velocidade ou as seções transversais trapezoidais, localizadas de forma a definir as mudanças na geometria dos canais;
- parâmetros hidrológicos (alguns dados e parâmetros são constantes para todos os trechos e outros devem ser definidos para cada trecho do rio);
- vazões de entrada e saída do rio;
- dados meteorológicos: cobertura de nuvens, umidade do ar, velocidade do vento e pressão barométrica;
- informações de qualidade da água: concentração dos constituintes nas nascentes e foz do rio (opcional), e a concentração dos constituintes para cada fonte de poluição pontual e difusa.

3.4. INVENTÁRIO DE RECURSOS HÍDRICOS

O aproveitamento dos recursos hídricos é influenciado por fatores como a distribuição geográfica das reservas naturais de água, se estão mais concentradas numa região do que noutra, as características do regime hidrológico em termos de distribuição e importância dos períodos úmidos e secos, bem como as características de qualidade de água. As principais observações a serem obtidas são referentes, ao clima (precipitação, evaporação, evapotranspiração, temperatura e outras), a quantidade (volumes de águas superficiais, características geológicas e hidrodinâmicas dos aquíferos) e à qualidade de água (determinação das poluições afluentes) (ANEEL & ANA, 2001).

Essas variáveis são medidas nos pontos de observação, chamados de “posto” ou “estação”. Como decorrência da variação espacial considerável dessas grandezas, necessita-se, para caracterizar uma bacia hidrográfica, de várias estações distribuídas sobre a sua superfície, o que leva ao conceito de redes de monitoramento, ou seja, um conjunto de estações pluviométricas (medidas de precipitação), fluviométricas (medidas do volume de água num curso de rio), sedimentométricas e meteorológicas distribuídas sobre uma determinada região (SANTOS *et al*, 2001).

Para a qualidade da água são realizadas coletas de amostras em campo para ser analisadas em laboratório para determinar os constituintes físicos, químicos e biológicos presentes na amostra. As coletas das amostras podem ser feitas manualmente por um técnico ou por meio de equipamentos automáticos.

3.5. LEGISLAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL

Ao longo das décadas de 70 e 80, a sociedade começou a despertar para as ameaças a que estava sujeita se não mudasse o comportamento quanto ao uso de seus recursos hídricos. O Brasil já dispunha de um texto sobre o direito da água desde 1934, o Código de Águas. Porém, tal ordenamento não foi capaz de incorporar meios para combater o desequilíbrio hídrico, a contaminação das águas e os conflitos de uso, nem, tampouco, de promover os meios de uma gestão descentralizada e participativa, exigência dos dias de hoje (ANEEL & ANA, 2001).

Para preencher esta lacuna foram sancionadas a Lei n.º 9.433, de 08 de janeiro de 1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e estabeleceu o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e a Lei n.º 9.984, de 27 de julho de 2000, que criou a Agência Nacional de Águas – ANA, entidade federal encarregada da implementação dessa Política e da coordenação deste Sistema (ANEEL & ANA, 2001).

A Lei n.º 9.433 estabelece novas diretrizes e um novo modelo de gerenciamento dos recursos hídricos, reconhece a água como bem de valor econômico e introduz novos instrumentos de gestão. Em seu texto, ela

proclama os seguintes princípios básicos, que são praticados em quase todos os países que avançam na gestão de recursos hídricos: a adoção da bacia hidrográfica como unidade de planejamento; os usos múltiplos da água, que coloca todas as categorias usuárias em igualdade de condições em relação ao acesso a esse recurso natural; reconhece a água como bem finito e com valor econômico; a gestão descentralizada e participativa e estabelece que, em situação de escassez hídrica, a prioridade deve ser dada para o abastecimento humano e a dessedentação de animais.

Esta lei definiu cinco instrumentos, com o objetivo de promover a gestão e o controle dos recursos hídricos. Os dois primeiros instrumentos, o plano de recursos hídricos e o enquadramento dos corpos d'água, dizem respeito à gestão quantitativa e qualitativa dos recursos hídricos. Esses instrumentos fortalecem a relação entre gestão dos recursos hídricos e do meio ambiente, a partir de formulação de metas a serem alcançadas, tomando como base a Resolução CONAMA nº 20/86. A outorga e a cobrança são os instrumentos para o controle do uso dos recursos hídricos. O quinto instrumento é o sistema nacional de informações, destinado a coletar, organizar, criticar e difundir a base de dados relativos aos recursos hídricos.

Os estados brasileiros estão se adaptando ao novo modelo de gerenciamento de recursos hídricos, aprovando suas respectivas leis de organização administrativa para o setor de recursos hídricos. No Paraná, a Lei n.º 12.726 de 1998 está em fase de regulamentação, e segue os mesmos princípios e diretrizes estabelecidos pela lei federal.

4. METODOLOGIA

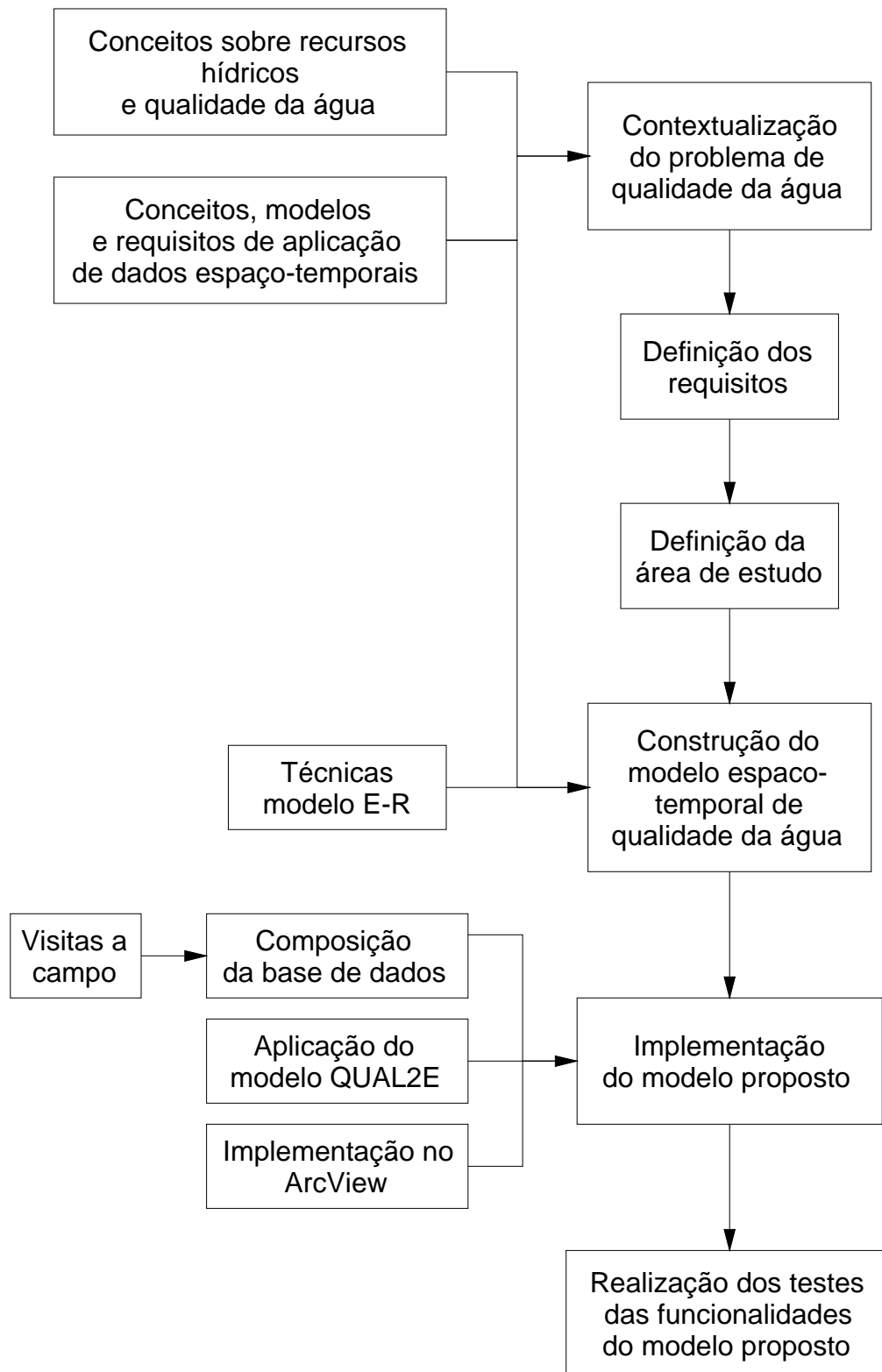
Para o desenvolvimento deste trabalho adotou-se a metodologia de análise de sistemas de informação que busca conhecer e entender as variáveis envolvidas em um problema para projetar e implementar uma solução, para fornecer informações que apoiem as operações e processos de tomada de decisão. A modelagem de dados é uma atividade desenvolvida em fases variadas do processo metodológico de desenvolvimento de sistemas, com a finalidade de levantar informações para a obtenção do modelo de dados, que é a representação gráfica e textual das estruturas, dos operadores e das regras que definem os dados (KELLER,1990). As fases desenvolvidas durante a execução deste trabalho estão apresentadas no diagrama na Figura 4.1.

Para determinar os conceitos e objetos relacionados, e identificar os requisitos de uma aplicação espaço-temporal em SIG para análise da qualidade da água em uma bacia hidrográfica, foi realizado uma ampla revisão bibliográfica dos conceitos, modelos e requisitos de aplicações de dados espaço-temporais e sobre recursos hídricos, qualidade da água e variáveis envolvidas. A revisão bibliográfica sobre dados espaço-temporais é apresentada no capítulo 2 e sobre recursos hídricos no capítulo 3.

Com base nos conceitos observados na revisão bibliográfica, o problema da qualidade da água de um rio pode ser contextualizado como descrito a seguir.

A qualidade da água de um rio é definida pela determinação dos valores de uma série de constituintes que são alterados em função de agentes externos, cuja existência se altera entre locais e datas. Os agentes externos que influenciam a qualidade da água são as fontes de poluição pontuais e difusas, as retiradas de água do rio e os eventos climatológicos.

FIGURA 4.1– ROTEIRO METODOLÓGICO



As fontes de poluição pontuais possuem localização definida e existem durante um período de tempo. As fontes de poluição difusas existem continuamente e variam de acordo com o uso e ocupação do solo, a quantidade de chuva e a população existente em uma região em uma data específica.

A capacidade de um corpo d'água de assimilar substâncias poluentes é influenciada pelas retiradas de água, chuvas e períodos de seca que alteram a quantidade de água disponível em um determinado momento. As retiradas de água do rio, denominadas captações, são realizadas por indústrias e estabelecimentos comerciais cuja existência varia de um local para outro e ao longo do tempo.

Existem duas maneiras de conhecer a qualidade da água do rio, através de análise laboratorial de amostras de água coletadas em campo, e através do uso de modelos matemáticos que simulam as condições hidráulicas e a capacidade de depuração do rio.

Para uma aplicação espaço-temporal a mudança no estado de uma ou mais localizações, entidades, ou ambas, é chamada de evento. No contexto deste trabalho, para entender a dinâmica das mudanças ocorridas na qualidade da água ao longo do tempo, é necessário que se possa associar as mudanças aos eventos que as ocasionaram.

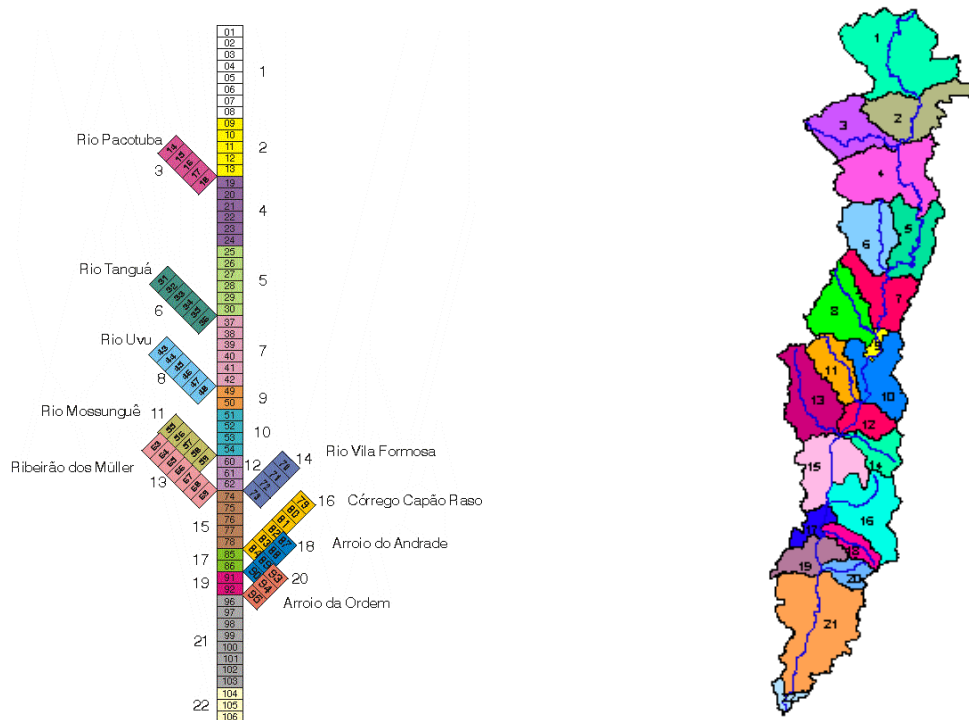
Uma das prerrogativas do gerenciamento de recursos hídricos, em relação à qualidade da água, é prever o impacto causado pela implantação de novos empreendimentos ou mudanças previstas pela ocupação humana em uma região. Para tanto, utilizam-se modelos matemáticos de simulação da qualidade da água. Dessa maneira foi identificada a necessidade, do modelo espaço-temporal proposto, utilizar um modelo matemático para simular a influência das fontes poluidoras na qualidade da água em uma bacia hidrográfica, e permitir a representação de realidades alternativas.

Para a definição de qual modelo matemático utilizar, considerou-se a disponibilidade, o grau de dificuldade de aprendizagem, e a capacidade do modelo de

simular as variáveis acima descritas, fontes poluidoras pontuais e difusas, retiradas da água e variação da quantidade de água no rio. Optou-se pelo QUAL2E por ser este um programa de domínio público, possuir interface gráfica de fácil utilização e ser largamente utilizado no estudo de impactos da alocação de lançamentos de resíduos em rios.

No modelo QUAL2E representa-se o rio por trechos que possuem características hidráulicas idênticas. Para cada trecho do rio são informados o volume de água (vazão) e as concentrações dos constituintes presentes nas cargas geradas pelas fontes de poluição difusas. Os trechos são divididos em elementos computacionais de mesmo comprimento, através dos quais são informadas ao modelo, as cargas geradas pelas fontes de poluição pontuais (pelo volume de efluentes lançado e concentrações dos constituintes presentes no efluente), e o volume de água retirado do rio pelas captações. A Figura 4.2 mostra o rio Barigüi e afluentes divididos em trechos e elementos computacionais.

FIGURA 4.2–DIVISÃO DO RIO BARIGÜI EM TRECHOS E SUB-BACIAS



FONTE: PROJETO BARIGUI (2003)

A partir desta contextualização e com base nos requisitos de uma aplicação espaço-temporal, definiu-se que a principal premissa para o desenvolvimento deste trabalho é que a qualidade da água do rio é alterada em função de eventos, e que, conhecendo-se quando e onde esses eventos ocorrem e quais mudanças causam, é possível entender a dinâmica da variação da qualidade da água, no espaço e no tempo. Sendo assim, o modelo de dados proposto deverá atender aos seguintes requisitos:

- a) utilizar os eventos como base para gerenciar as mudanças ocorridas na qualidade da água;
- b) tratar eventos atuais, passados e futuros e permitir a existência de realidades alternativas;
- c) gerenciar os agentes externos que interferem na qualidade da água do rio, as fontes de poluição pontuais e difusas e as captações de água, conhecendo-se sua localização, período de existência e a quantidade de poluição gerada por elas;
- d) tratar diferentes vazões por trecho de rio;
- e) determinar a situação da água a partir do uso do modelo matemático de simulação QUAL2E;
- f) comparar os valores gerados pelo QUAL2E com valores medidos em campo;
- g) propiciar as seguintes funções de uma aplicação espaço-temporal em SIG: inventário, atualização, apresentação e análise.
- h) responder as seguintes consultas, que foram definidas com base nos requisitos de uma aplicação espaço-temporal em SIG, definidos por LANGRAN (1992) e adaptadas para o problema de qualidade da água em uma bacia hidrográfica:
 - A que bacia pertence um determinado rio?
 - Quais os rios pertencentes a uma bacia hidrográfica?
 - O que existe no entorno do rio em uma determinada data?

- Onde existe uma fonte de poluição?
- Quais as fontes de poluição pontuais existentes em uma data específica?
- Qual o período de existência de uma determinada fonte de poluição?
- Qual a quantidade e que tipo de constituinte é lançado no rio por determinada fonte pontual em uma data específica?
- Qual é a qualidade da água em qualquer local em uma data específica?
- Houve alteração na qualidade da água? Se sim, porque?
- Que evento aconteceu em determinada data/local?
- Onde e quando aconteceu determinado evento?
- Como ficará a qualidade da água se ocorrer determinado evento?
- Qual o tipo da fonte pontual (industrial, esgoto, etc.)?
- Qual a quantidade e que tipo de constituinte é lançado em determinado trecho do rio, em uma determinada data?
- Houve alteração na carga gerada por uma fonte de poluição difusa? Se sim, porque?
- Qual o uso do solo em determinado local e determinada data?
- Se houve alteração no uso do solo, quais são os valores anteriores?
- Qual é a população em uma determinada data e local?
- Se houve alteração na população em um determinado local, qual era a população antes?
- Onde existe uma captação de água em determinada data?
- Qual o período de existência de uma captação?

O passo seguinte no desenvolvimento do trabalho foi a definição da área de estudo para posterior implementação do modelo de dados proposto. Para esta definição foi considerado como requisito fundamental que a bacia contemplasse grande parte

dos agentes envolvidos nos processos relativos à degradação da qualidade da água. Também foi considerado um requisito importante a existência de dados georeferenciados, de dados cadastrais e de dados referentes à calibração do QUAL2E.

A bacia do rio Barigüi foi escolhida por apresentar uma matriz de poluição bastante complexa pois além de ser uma bacia bastante urbanizada, com grande concentração populacional, abriga a Cidade Industrial de Curitiba, e apresenta problemas de qualidade da água. Esta bacia já havia sido objeto de estudos relativos à qualidade da água e estavam disponíveis dados de calibração para o modelo QUAL2E, no Departamento de Hidráulica e Saneamento da UFPR, além de dados cadastrais sobre usuários de recursos hídricos e bases georeferenciadas na Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental - SUDERHSA. A descrição da bacia é apresentada no capítulo 5.

Com base na definição dos requisitos e nas condições existentes na bacia do rio Barigüi foram definidos os elementos de interesse para o trabalho.

Foram consideradas, como sendo relevante para este trabalho, as seguintes fontes de poluição pontuais:

- a) indústrias;
- b) estações de tratamento de esgoto;
- c) aterros sanitários;
- d) estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços;
- e) lançamentos de esgoto *in natura*.

As fontes de poluição difusas são definidas em função de uma série de variáveis. Existem vários métodos propostos para determinação destas fontes, com variados graus de complexidade. Para este trabalho adotou-se o *simple method* (SCHUELER, 1987) que utiliza o uso e ocupação do solo, as concentrações médias de poluentes no escoamento superficial por tipo de cobertura de solo e a precipitação

anual média. Este método foi escolhido por ser um dos possíveis métodos para a determinação das cargas poluidoras difusas, e já ter sido aplicado em bacias brasileiras. Foram considerados também como fonte de poluição difusa os esgotos domésticos não tratados cujos pontos de lançamento não são conhecidos. Portanto, os elementos envolvidos nas fontes de poluição difusas, com relevância para este trabalho, são população, uso e ocupação do solo e precipitação anual média.

Foram considerados como eventos, para os propósitos deste trabalho, os acontecimentos que alteram a situação das fontes pontuais e difusas, captações de água, e quantidade de água do rio, listados a seguir:

- a) abertura ou fechamento de indústrias, estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços;
- b) implantação ou desativação de aterros sanitários e sistemas de tratamento de esgoto;
- c) início ou fim de lançamento de esgoto *in natura*;
- d) aumento ou diminuição na quantidade de efluentes lançados no rio;
- e) aumento ou diminuição da quantidade de água captada do rio;
- f) alteração no processo de tratamento de efluentes;
- g) alteração significativa no uso do solo ou população;
- h) períodos de chuva ou seca.

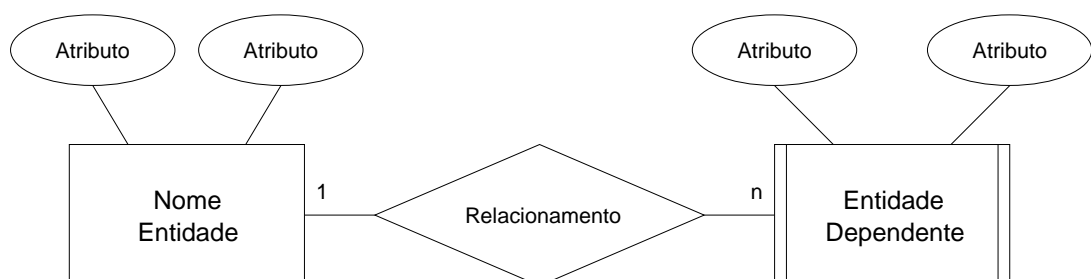
A fase seguinte, a construção do modelo de dados espaço-temporal, baseou-se na análise semântica das variáveis de interesse, nos requisitos definidos e nos conceitos de dados espaço-temporais previamente descritos. Nesta etapa foram definidos as entidades, os relacionamentos e os atributos das variáveis contemplados pelo modelo espaço-temporal proposto utilizando-se as técnicas do modelo entidade-relacionamento.

Os modelos de dados são veículos para descrever a realidade, sendo que o objetivo na construção de um modelo de dados é que ele seja tão completo e expressivo quanto possível, para a finalidade a que se destinam. Os modelos de dados semânticos, como é o caso do modelo E-R, procuram capturar os relacionamentos semânticos existentes entre as entidades do mundo real. Para isso empregam mecanismos de representação de alto nível de abstração, tais como representação de hierarquias de subconjunto e de generalização, restrições de cardinalidade e de atributos compostos e multivalorados (KELLER,1990).

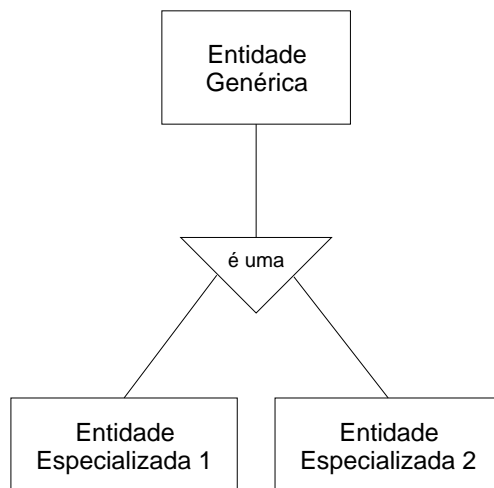
O modelo E-R descreve a estrutura de um modelo de dados por meio de diagramas. A notação utilizada neste trabalho, é a notação abordada por KORTH e SILBERSCHATZ (1995). Nesta notação, apresentada na Figura 4.3a, as entidades são representadas por retângulos, os relacionamentos entre elas por losangos e os atributos por elipses. As linhas conectam os atributos às entidades e as entidades aos relacionamentos. A cardinalidade é expressa nos relacionamentos, através da indicação das expressões 1:0, 1:1, 1:N, que significam que para cada ocorrência de uma determinada entidade pode existir nenhuma, uma ou várias ocorrências de uma outra entidade. As entidades que são dependentes de outra entidade são representadas por um retângulo com bordas duplas. A generalização ou especialização de uma entidade é representada por um triângulo (Figura 4.3b).

FIGURA 4.3– NOTAÇÃO DO MODELO E-R

a)



b)



O modelo espaço-temporal proposto é apresentado no capítulo 5. Para facilitar o entendimento do modelo foram criados vários diagramas, listados a seguir:

- a) diagrama geral;
- b) diagrama do sistema de rios;
- c) diagrama de eventos;
- d) diagrama das fontes pontuais de poluição;
- e) diagrama das cargas poluidoras difusas provenientes da população;
- f) diagrama das cargas poluidoras difusas provenientes do escoamento superficial;
- g) diagrama das captações de água;
- h) diagrama dos fenômenos climatológicos;
- i) diagrama das estações de monitoramento;
- j) diagrama dos dados específicos do QUAL2E.

A implementação do modelo espaço-temporal foi realizada utilizando-se o SGDB ACCESS da Microsoft e o SIG ArcView 3.2 da ESRI.

O ACCESS foi escolhido em função da ampla utilização desta plataforma, disponibilidade e facilidade de uso. O ArcView foi escolhido por implementar os modelos de representação de dados espaciais *campo* e *objeto*, ter a capacidade de trabalhar com banco de dados e ser o programa adotado pela maioria das entidades governamentais de meio ambiente no Brasil, dentre elas a SUDERHSA, que é o órgão responsável pelo gerenciamento dos recursos hídricos no Estado do Paraná.

As etapas realizadas para a implementação do modelo proposto foram a composição da base de dados, que envolveu o ajuste dos dados disponíveis na estrutura proposta pelo modelo, a aplicação do modelo QUAL2E e a implementação no ArcView. No intuito de compor uma base capaz de mostrar a eficiência do modelo em simular eventos passados, presentes e futuros foram levantados dados de população de 1996, 2000, e projeções de 2005, 2010, 2015 e 2020, dados de indústrias e estabelecimentos comerciais e de serviços, estações de tratamento de esgoto, aterros sanitários e lançamentos de esgoto *in natura*.

Os dados utilizados para compor a matriz das fontes de poluição da bacia e a base cartográfica foram provenientes do projeto “Avaliação de Benefício-Custo de Medidas de Controle de Cheias e Despoluição Urbana – Estudo de caso da Bacia do Rio Barigüi”⁶, do projeto Cadastro de Usos e Usuários de Recursos Hídricos da Bacia do Alto Iguaçu (SUDERHSA, 1999), do Sistema de Informações Geográficas para Gestão de Recursos Hídricos (SUDERHSA, 2000), do Cadastro de Indústrias de Curitiba (IPPUC, 2003) e do Censo do IBGE de 1996, fornecido pela COMEC.

⁶ O projeto “Avaliação de Benefício-Custo de Medidas de Controle de Cheias e Despoluição Urbana – Estudo de caso da Bacia do Rio Barigüi”, será doravante referido como projeto Barigüi.

Durante a etapa de preparação dos dados foram identificadas algumas inconsistências entre a base cartográfica e os dados cadastrais. Foram realizadas duas visitas a campo, uma às nascentes do Rio Barigüi e outra a cidade industrial, para elucidar essas inconsistências e corrigir os dados.

A partir da base de dados composta foi realizada uma análise dos dados a fim de identificar os eventos de relevância, passados ou futuros, na bacia hidrográfica, para a aplicação do QUAL2E. Foram identificados 13 eventos listados no Quadro 4.1.

QUADRO 4.1– EVENTOS

CÓDIGO	DESCRICAO EVENTO	DATA
1	Aumento População	1996
2	Instalação Novas Indústrias	1997
3	Substituição RALFs / Instalação ETE Sta Quitéria / Novas Captações	1998
4	Eliminação Lançamentos de Esgoto In Natura	1999
5	Aumento População / Nova Captação	2000
6	Nova Captação SANEPAR	2002
7	Eliminação RALFs / Instalação ETE CIC Xisto / Novas captações	2003
8	Fechamento Indústria White Martins / Enc. Captação / Aumento População	2004
9	Chuva	27/4/2004
10	Implantação ETES Tranqueira / Taboão / Tamandaré	2005
11	Aumento População	2010
12	Aumento População / Ampliação Rede Coletora de Esgoto	2015
13	Aumento população	2020

Para compor a matriz de poluição para a realização das simulações para os diversos eventos, foram extraídas do banco de dados as concentrações de cargas difusas para estes 13 eventos considerando a vazão média de longo período (Q_{mlp}), as cargas pontuais através da tabela de lançamento de efluentes para o parâmetro DBO_5 , e as retiradas de água pela tabela de captações. Os coeficientes e taxas usadas pelo QUAL2E foram os definidos pelo Projeto Barigüi, sendo utilizados os mesmos para todas as simulações.

Foi realizada uma simulação pra cada evento, utilizando o QUAL2E em regime permanente. Para o evento 13, foram realizadas duas simulações, com cenários

alternativos, uma considerando que as obras de saneamento previstas pela SANEPAR serão realizadas e a outra considerando que não serão realizadas. Os resultados gerados pelo QUAL2E foram carregados no banco de dados.

Os dados foram implementados no ArcView, criando-se uma série de visões para apresentação, comparação e análise dos dados. As etapas realizadas para a implementação do modelo espaço-temporal são apresentadas no capítulo 6.

Os resultados das análises e consultas realizadas com o modelo proposto, são apresentados no capítulo 7.

5. MODELO DE DADOS ESPAÇO-TEMPORAL PROPOSTO

5.1. DESCRIÇÃO DA BACIA DO BARIGÜI

A bacia do rio Barigüi está localizada na RMC, e abrange os municípios de Curitiba, Almirante Tamandaré e Araucária. O rio Barigüi é afluente da margem direita do rio Iguaçu e suas nascentes, apresentadas na Figura 5.1, estão localizadas na serra da Betara, próximo à divisa dos municípios de Almirante Tamandaré e Rio Branco do Sul, nas coordenadas 25° 13' 54" Sul e 49° 17' 18" Oeste.

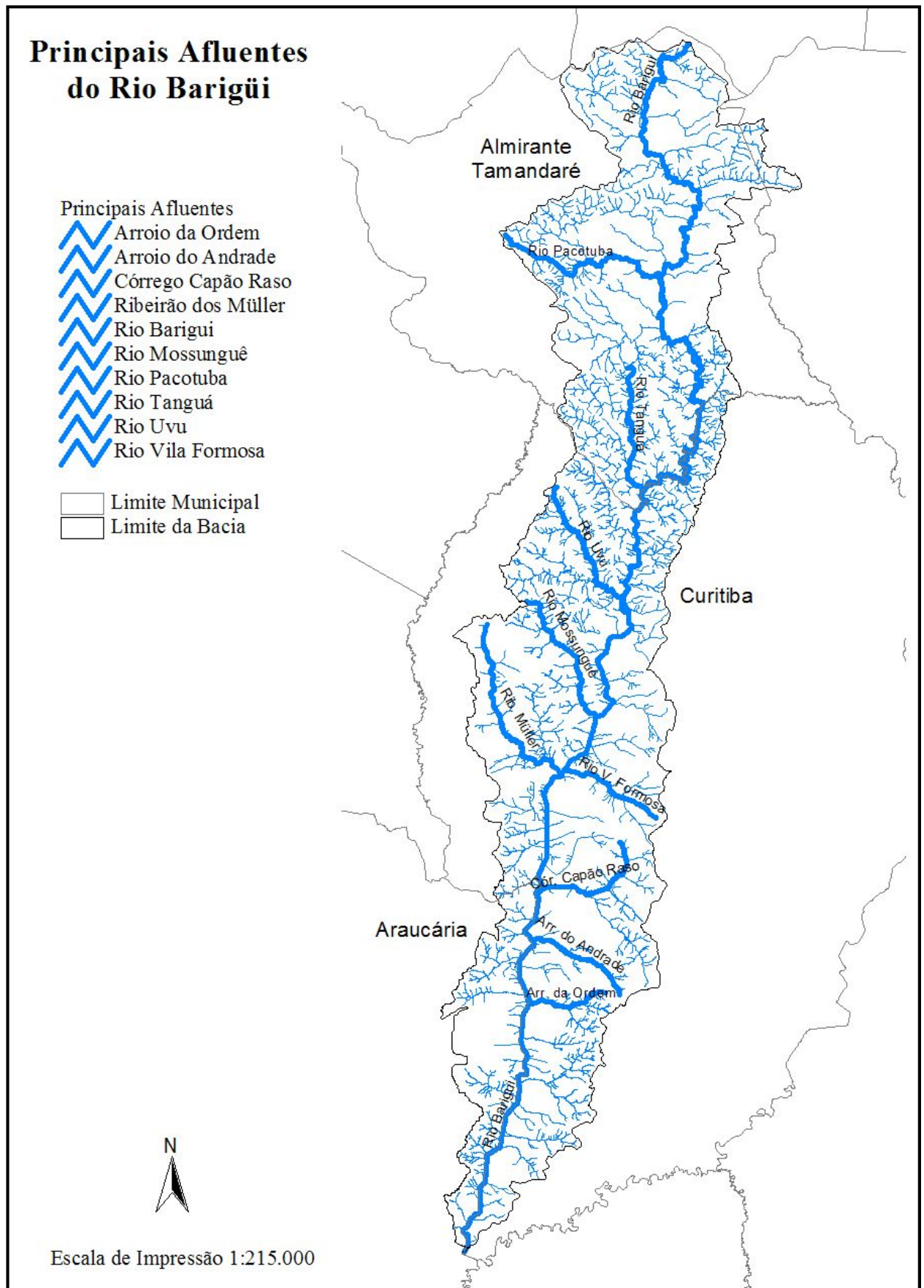
FIGURA 5.1– FOTOS DA NASCENTE DO RIO BARIGÜI



A extensão do rio Barigüi é de 67 km e a área total de drenagem da bacia é de 265 km². Os principais afluentes do rio Barigüi, apresentados na Figura 5.2, são: rio Campo Comprido; rio Pacotuba; rio Tanguá; rio Uvu; ribeirão dos Muller; rio Vila Formosa; rio Passo do França; arroio do Andrade; e arroio da Ordem.

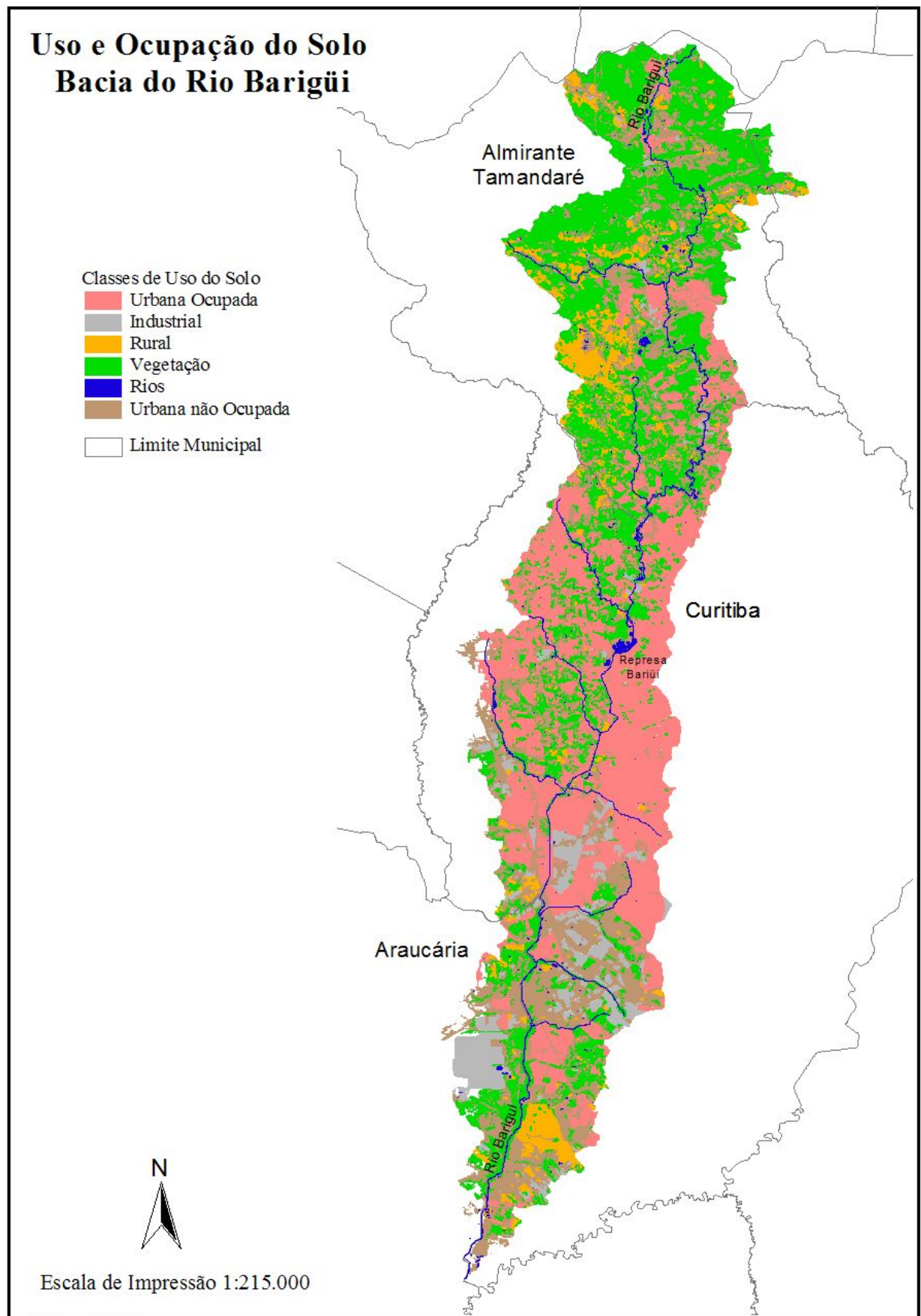
O rio Barigüi é o principal rio de Curitiba e sua bacia envolve 33% da área do município. Conforme mostra a Figura 5.3, a bacia é bastante urbanizada no município de Curitiba, concentra uma grande área industrial nos municípios de Curitiba e Araucária, e áreas agrícolas no município de Almirante Tamandaré.

FIGURA 5.2 – PRINCIPAIS AFLUENTES DO RIO BARIGÜI



FONTE: SUDERHSA (2000)

FIGURA 5.3 – USO E OCUPAÇÃO DO SOLO DA BACIA DO RIO BARIGÜI



FONTE: SUDERHSA (2000)

A bacia apresenta uma matriz de poluição complexa envolvendo problemas relativos a atividades econômicas e densidade populacional. Por abrigar a CIC, a bacia concentra a maior parte das indústrias do Estado do Paraná, além de inúmeros estabelecimentos comerciais e prestadores de serviço. A Figura 5.4 apresenta um mapa dos estabelecimentos, industriais comerciais e de serviços localizados na bacia, considerados neste trabalho, com base nos dados da SUDERHSA e IPPUC. A Figura 5.5 mostra a densidade populacional por setor censitário do IBGE (1996).

O tratamento de esgoto doméstico na bacia passou por diferentes estágios ao longo dos anos. Entre 1972 e 1975 o esgoto da bacia era tratado pela Estação de Tratamento de Esgoto Belém, a partir de 1981 houve a descentralização, com instalação de diversos Reatores Anaeróbicos de Leito Fluidizado (RALF) em conjuntos habitacionais. Em 1998 foi criada a estação Santa Quitéria, e a partir de 1999 os RALFs começaram a ser desativados. Em 2003 teve início a operação da ETE CIC/XISTO. A previsão da SANEPAR é a instalação de mais 3 Estações de Tratamento de Esgoto, Taboão, Tamandaré e Tranqueira, a partir de 2005, e a desativação de todos os RALFs (PROJETO BARIGUI, 2003).

A bacia sofreu os efeitos do processo de urbanização desordenado, e, como a maioria das bacias brasileiras, encontra problemas relacionados a ocupações irregulares, lançamento de esgotos domésticos *in natura*, disposição inadequada de lixo, dentre outros. A Figura 5.6 apresenta um mapa das ocupações irregulares, lançamento de esgotos domésticos *in natura*, e lixões ou aterros sanitários, que foram levantados em campo durante a realização do projeto Cadastro de Usos e Usuários de Recursos Hídricos da Bacia do Alto Iguaçu (SUDERHSA, 1999).

O uso predominante dos recursos hídricos na bacia é para lançamento de efluentes. A maioria das captações existentes é de água subterrânea, não existindo captações superficiais de grande porte, conforme mostra a Figura 5.7.

FIGURA 5.4 – ESTABELECIMENTO INDUSTRIAIS, COMERCIAIS E PRESTADORES DE SERVIÇOS

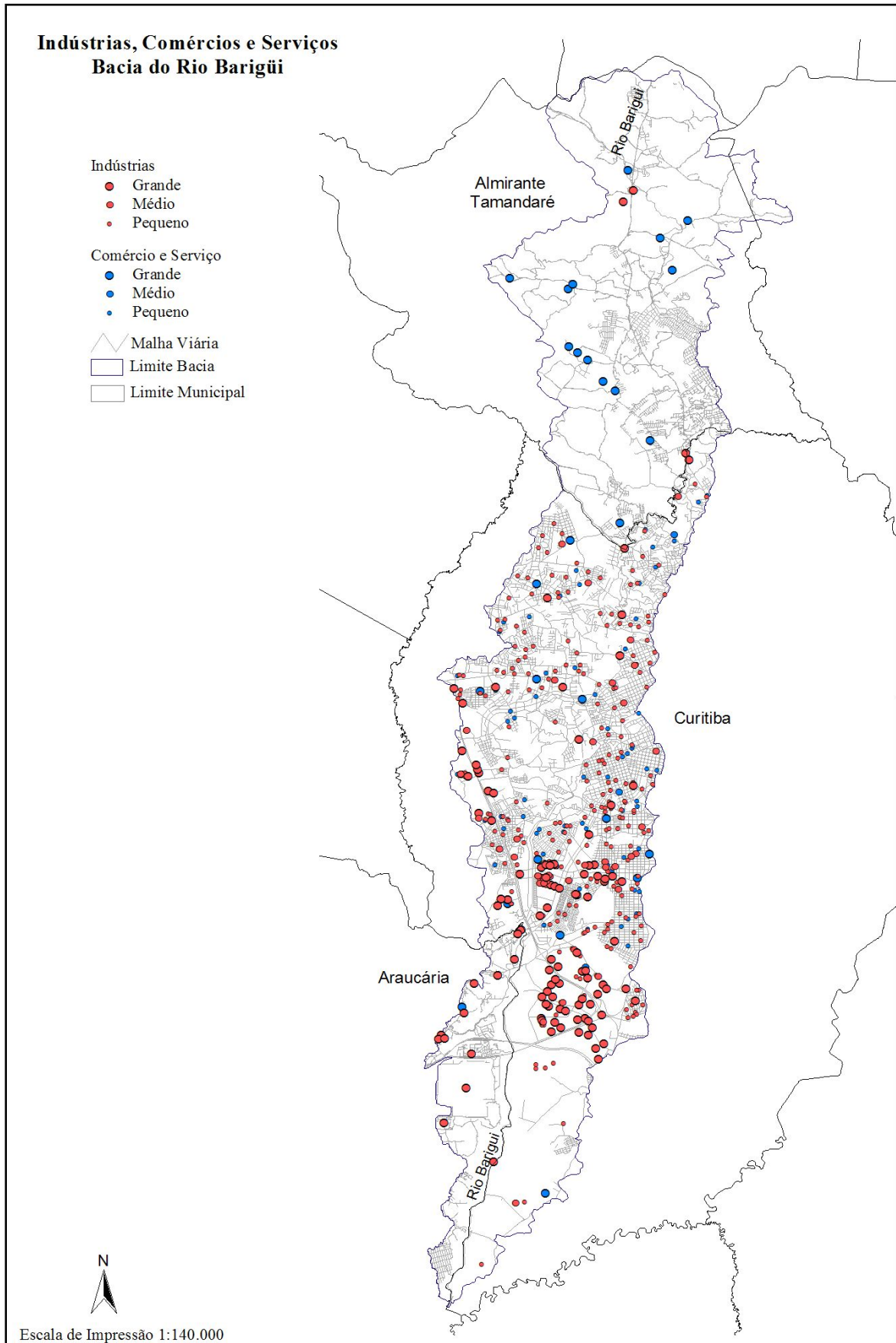
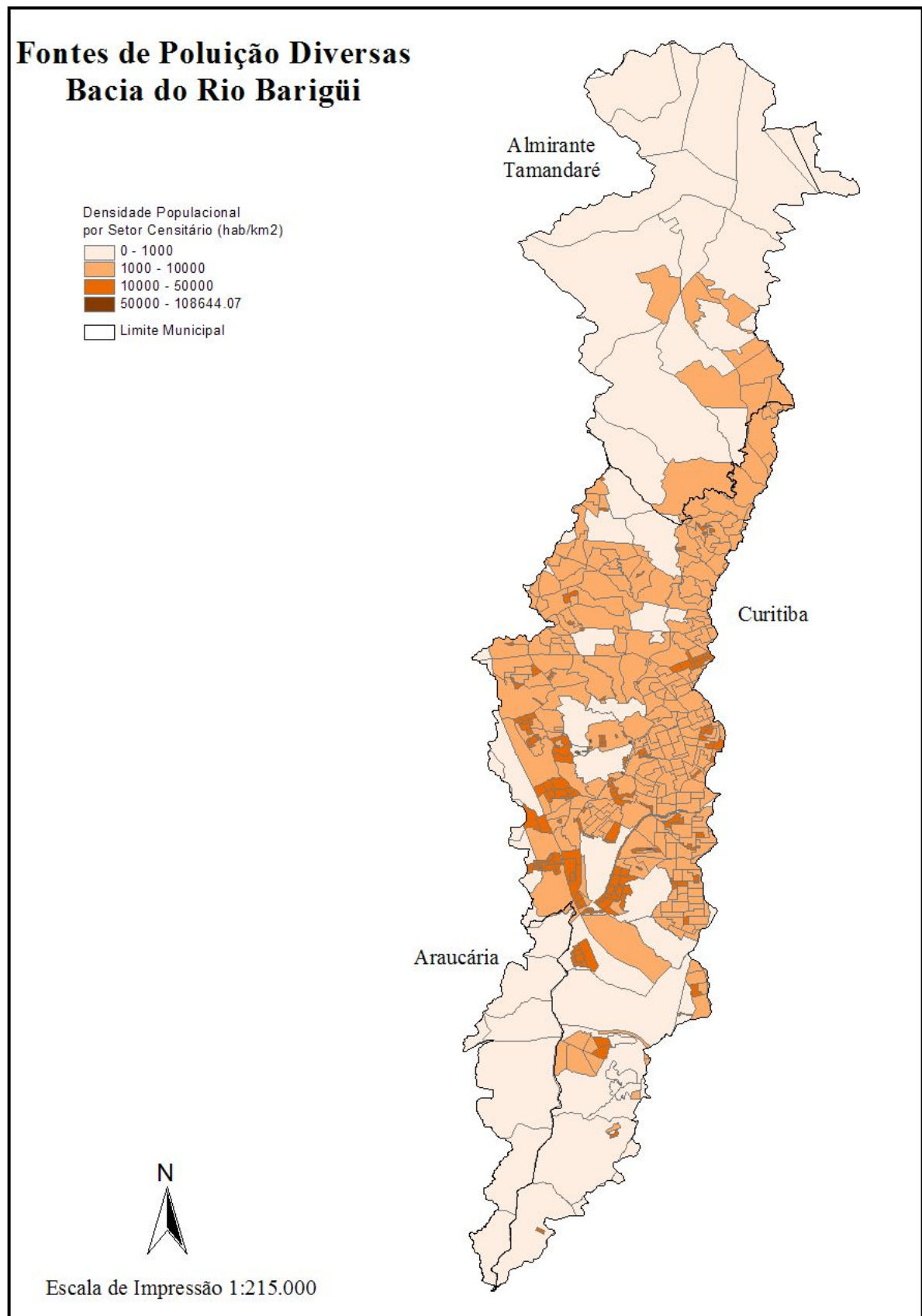


FIGURA 5.5- DENSIDADE POPULACIONAL



FONTE: IBGE (1996)

FIGURA 5.6 FONTES DE POLUIÇÃO DIVERSAS

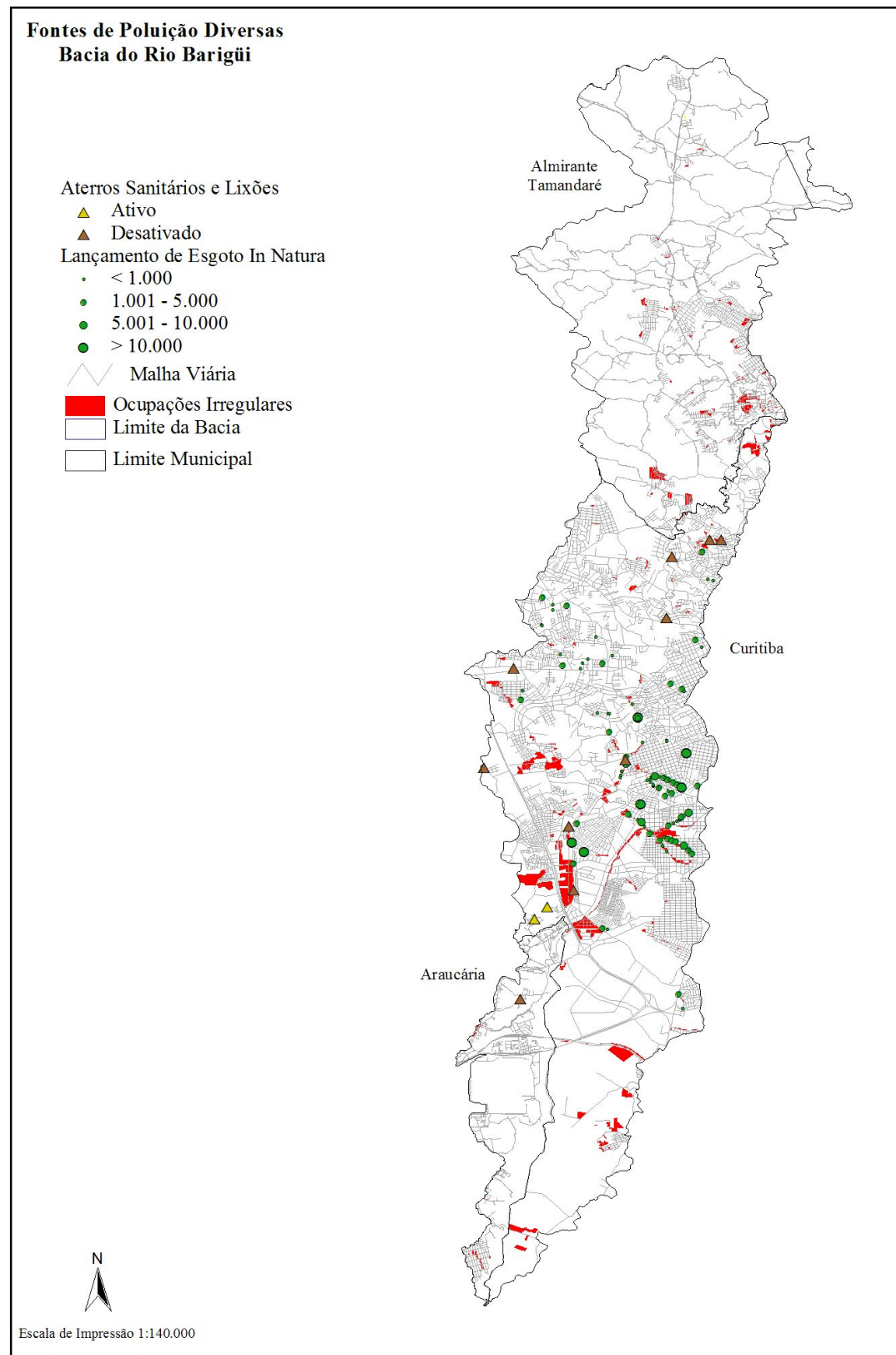
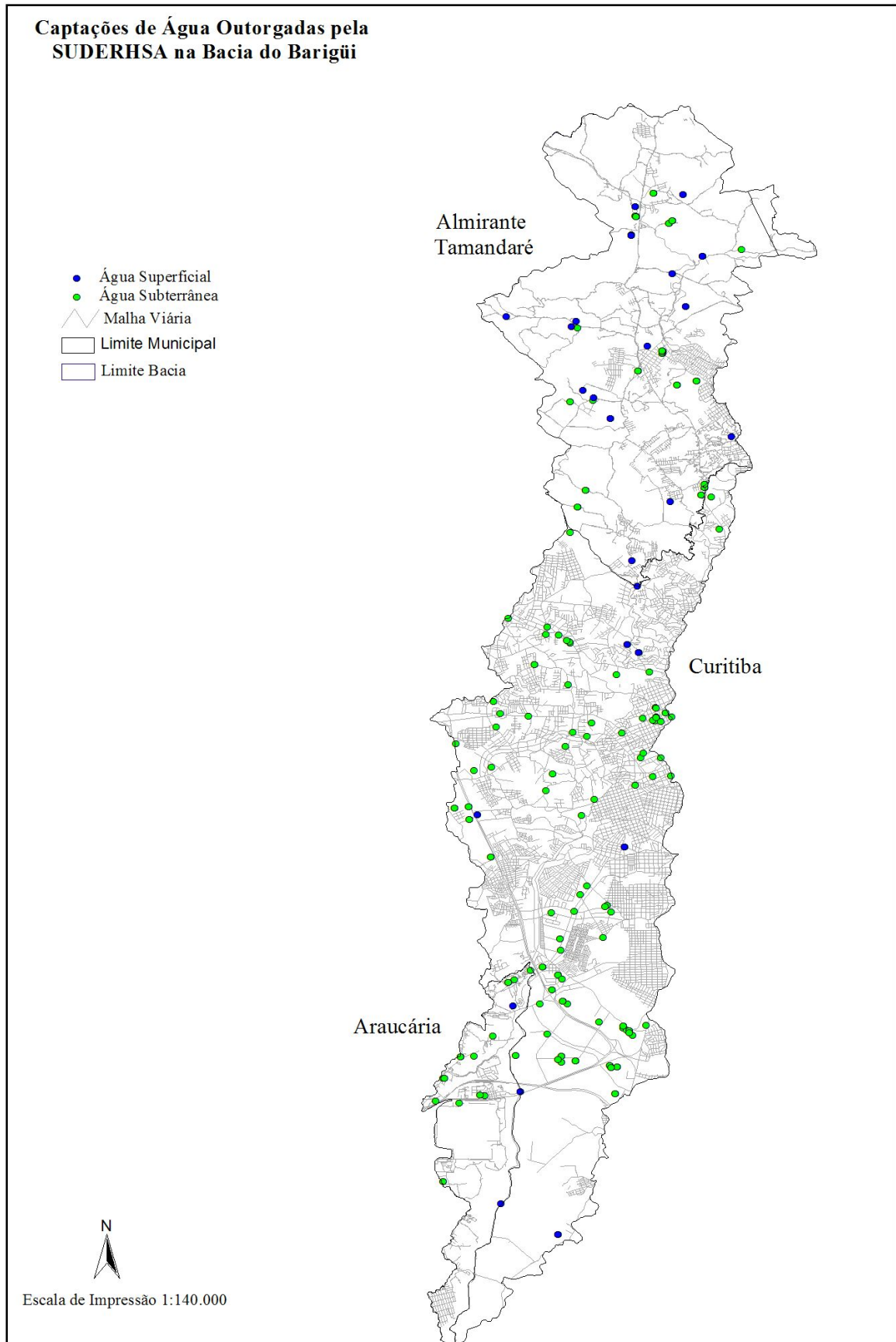


FIGURA 5.7– CAPTAÇÕES DE ÁGUA NA BACIA DO RIO BARIGÜI



5.2. ADAPTAÇÃO DO MODELO ESTDM

Para atender a premissa de que a qualidade da água é alterada em função de eventos, definiu-se que o modelo de representação espaço-temporal deve ser baseado no tempo e tenha a capacidade de tratar eventos. O modelo “Dados Espaço-temporais baseado em Eventos – ESTDM”, proposto por PEUQUET e DUAN (1995), é adequado a esta tarefa pois é baseado em eventos e utiliza o tempo como base para organizar os dados espaciais, o que permite registrar o momento e o local das mudanças ocorridas.

A proposta original de PEUQUET e DUAN (1995) emprega o modelo de dados *campo* para representar um único domínio temático, como a temperatura, por exemplo. Esta representação seria adequada para a qualidade da água, se o rio fosse considerado como universo de representação. Desta forma o rio seria representado por uma matriz regular, onde cada célula teria um valor correspondente a qualidade da água naquele ponto e naquele momento.

No entanto, como o rio é uma entidade discreta e o QUAL2E considera o trecho de rio como uma unidade de características homogêneas, adotou-se o trecho de rio como menor unidade para representação da qualidade da água, propondo-se uma adaptação do modelo ESTDM para utilizar o modelo de representação *objeto*. Desta maneira, a cada vez que ocorrer um evento uma nova simulação será executada e será criada uma nova entrada no banco de dados, pela adição de um novo registro de tempo, através do evento. A este registro de tempo, ou seja, ao evento, será associada uma notação específica das mudanças ocorridas, e o resultado da simulação da qualidade da água, para o trecho do rio. Assim será possível armazenar para um mesmo rio o resultado de várias simulações, através dos trechos que podem assumir diferentes valores para diferentes datas, e identificar posteriormente quais as entidades envolvidas em determinada simulação.

Outra diferença entre o modelo proposto neste trabalho e a proposta original de PEUQUET e DUAN (1995) é que neste modelo o tempo será *ramificado*, permitindo a existência de realidades alternativas, enquanto no modelo original o tempo era *ordenado seqüencialmente*.

5.3. MODELO E-R

A seguir serão apresentados os diagramas com a estrutura do modelo proposto, construídos a partir da análise semântica das variáveis envolvidas no problema da qualidade da água, e os requisitos de uma aplicação espaço-temporal em SIG.

5.3.1 Diagrama Geral

A qualidade da água existe continuamente no espaço delimitado por um rio. Não possui domínio espacial nem temporal, é um atributo do rio que varia no espaço e no tempo, em função da influência de agentes externos. A área de influência desses agentes é delimitada pela área de drenagem do rio que é a bacia hidrográfica. A mudança de um estado da qualidade da água para outro é determinada pelos eventos relacionados aos agentes externos. A situação da qualidade da água do rio pode ser conhecida através do uso de um modelo matemático que simula a capacidade de depuração do rio.

As fontes de poluição pontuais, que são entidades discretas cuja existência varia de um local para outro e ao longo do tempo, são as seguintes:

- a) indústrias;
- b) estações de tratamento de esgoto;
- c) aterros sanitários;

- d) estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços;
- e) lançamentos de esgoto *in natura*.

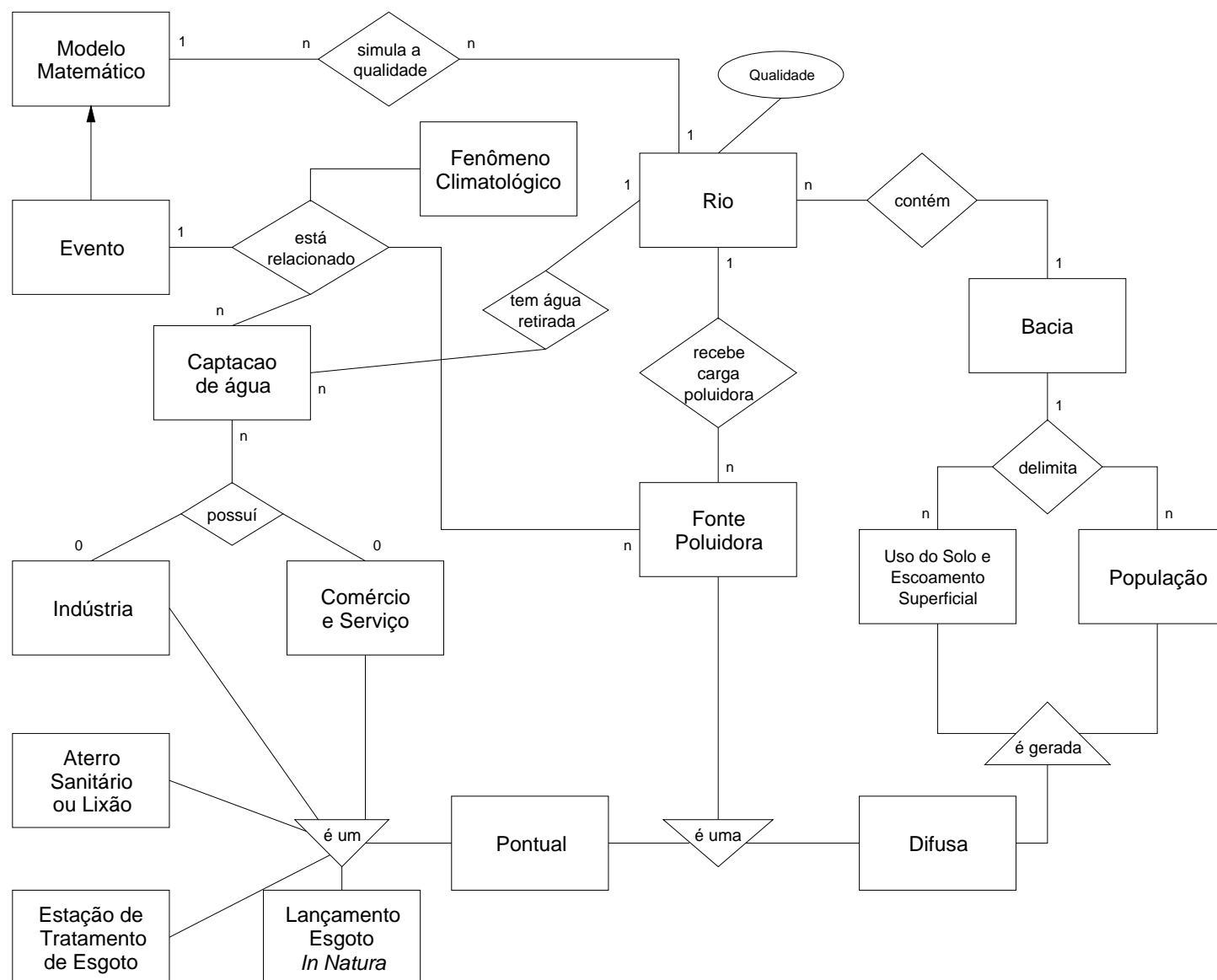
As fontes de poluição difusas existem continuamente no espaço e no tempo, variando de um local e de uma data para outra em função do uso e ocupação do solo, quantidade de chuva e a população existente em uma região em um determinado momento. A capacidade de um corpo d'água de diluir resíduos é influenciada pelas captações, que são realizadas por indústrias e estabelecimentos comerciais e de serviços, e pelos fenômenos climatológicos. Quando ocorre um evento, o modelo matemático de simulação da qualidade da água deve ser aplicado para se conhecer a nova situação de qualidade do rio.

O diagrama apresentado na Figura 5.8, mostra a visão geral do modelo espaço-temporal proposto, apresentando as entidades envolvidas na qualidade da água em uma bacia hidrográfica e os relacionamentos entre elas. Neste diagrama algumas entidades, relacionamentos e atributos foram propositalmente omitidos para simplificar a leitura.

5.3.2 Diagrama do Sistema de Rios

A bacia hidrográfica contém o rio principal e seus afluentes, sua área é relativa à área de drenagem do rio principal. Uma bacia pode ser subdividida em sub-bacias, que são as áreas de drenagem dos rios afluentes que podem também, por sua vez, ser subdivididas em unidade menores de drenagem, relativas a seus afluentes ou áreas de contribuição direta do rio principal. Essas unidades menores são denominadas de micro-bacias. A *Bacia*, *Sub-Bacia* e *Micro-Bacia* são entidades

FIGURA 5.8 – VISÃO GERAL DO MODELO ESPAÇO-TEMPORAL PROPOSTO



discretas, ou seja possuem identidade e localização conhecidas, e são representadas pelo modelo de dados *objeto*. São dados que possuem somente um domínio *espacial*, seus limites e propriedades geométricas não se alteram com o tempo. Os atributos dessas entidades são código, nome e área.

O *rio* é uma entidade discreta, possui identidade e localização conhecida, portanto, é representado pelo modelo de dados *objeto*. É um *dado espacial*, pois sua geometria (forma, tamanho, posição e orientação) não se altera com o tempo. O rio pode ser principal ou afluente. Os atributos da entidade *Rio* são nome e código.

O modelo QUAL2E subdivide o rio em trechos com características hidráulicas uniformes. O *trecho* é uma entidade dependente da entidade *Rio*, sua existência e identificação estão vinculadas ao rio. Um trecho é identificado pelo rio a que pertence e um número correspondente à sequência daquele trecho no rio, por exemplo, se um rio possuir cinco trechos, o primeiro receberá o número 1, o segundo receberá o número 2, e assim sucessivamente. O QUAL2E subdivide o trecho em elementos computacionais de mesmo comprimento, e assim como os trechos são dependentes do rio, os elementos computacionais são dependentes do trecho. Cada elemento computacional corresponde a uma ou mais micro-bacias.

Para determinar a influência da chuva na qualidade da água do rio, é necessário que o modelo possa suportar diferentes vazões medidas em campo em diferentes datas. Também é usual a utilização de vazões de regionalização para determinação dos impactos de determinadas ações sobre a qualidade da água em uma bacia hidrográfica. Como o modelo QUAL2E permite o uso de diferentes vazões para cada trecho do rio, é necessário que o modelo espaço-temporal proposto permita a existência de diferentes vazões, de diferentes tipos (medidas ou regionalizadas) para diferentes datas por trecho de rio. Para atender este requisito foi criada a entidade *Tipo Vazão* que contém os seguintes atributos: código e descrição (medida, ou regionalizada que pode ser, $Q_{10,7}$, $Q_{5,30}$, Q_{80} , Q_{90} , Q_{mlp}). Através do relacionamento desta entidade

com a entidade *Trecho* é possível armazenar diferentes vazões por trecho de rio. O relacionamento *Trecho Vazão* possui os atributos data e valor.

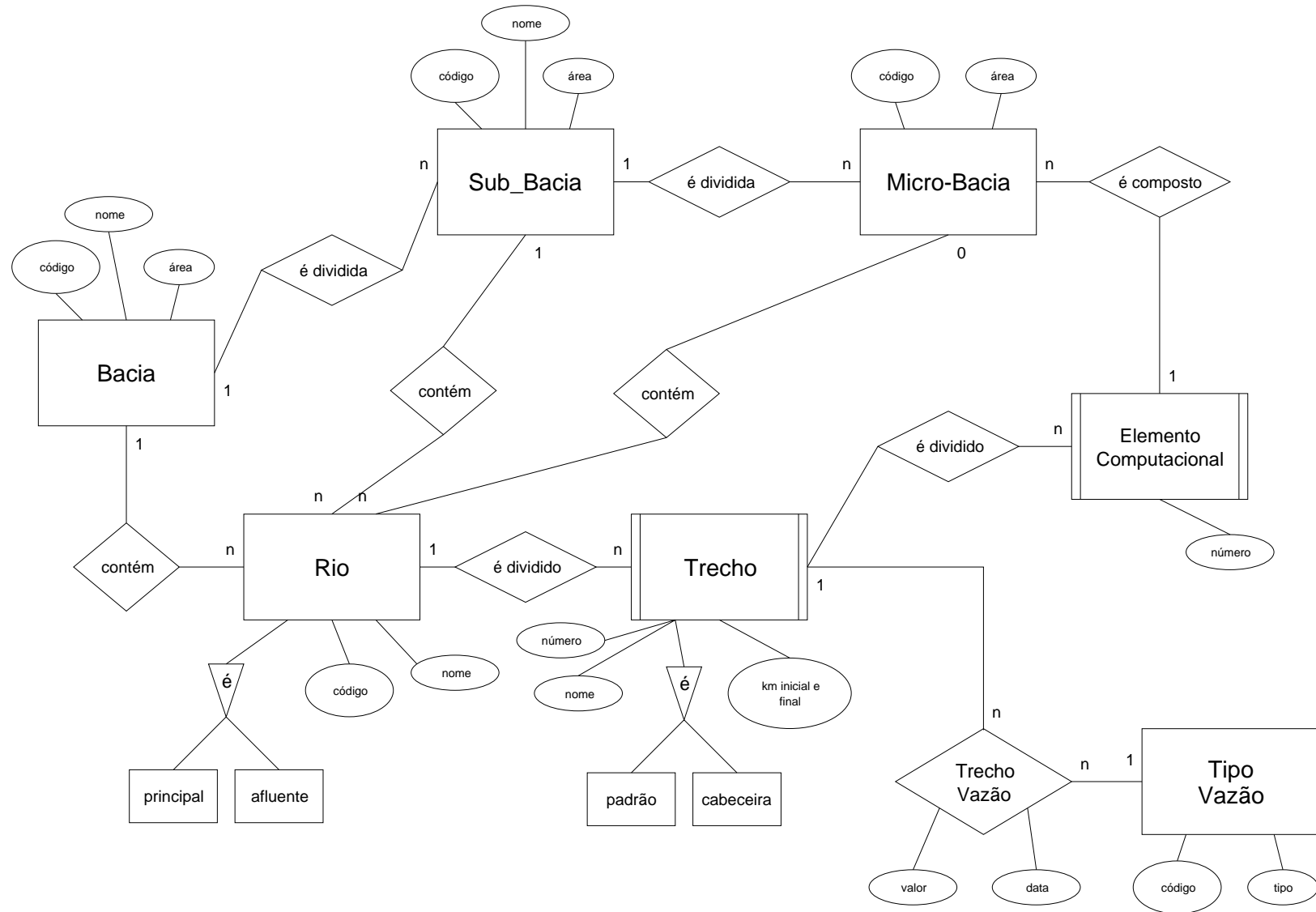
O diagrama das entidades, relacionamentos e atributos acima descritos, é apresentado na Figura 5.9.

5.3.3 Diagrama de Eventos

Os eventos considerados neste trabalho são únicos, ou seja, ocorrem uma única vez e de forma instantânea, não têm duração, nem periodicidade, com exceção dos períodos de chuva ou seca. Para o objetivo deste trabalho que é avaliar o impacto dos agentes externos sobre a qualidade da água do rio ao longo do tempo, as mudanças causadas por esses eventos serão vistas como repentinas. As mudanças ocorridas na população ou uso do solo embora sejam graduais, não são quantificadas constantemente, são conhecidas a partir de levantamentos realizados com algum intervalo de tempo, e serão tratadas como repentinas.

A entidade *Evento* possui a descrição dos eventos que alteram a qualidade da água na bacia. O evento é um *dado temporal* pois possui somente o domínio temporal, neste caso a data de ocorrência. Esta entidade não é ordenada temporalmente, admitindo o cadastramento de eventos presentes, passados e futuros, tornando possível, desta forma representar realidades alternativas. Os atributos desta entidade são: código, descrição, data de início e fim. A existência de um evento está vinculada a existência da bacia hidrográfica, portanto, a Entidade *Evento* é dependente da entidade *Bacia*.

FIGURA 5.9 – DIAGRAMA DO SISTEMA DE RIOS



Um evento poder ser relativo a apenas uma ou a várias mudanças, e pode, desta maneira, estar relacionado a diversas entidades, fontes de poluição pontuais ou difusas, captações da água ou fenômenos climatológicos. A entidade *Fonte Evento* relaciona o evento com as entidades envolvidas e contém uma notação específica da mudança ocorrida. Esta entidade é dependente da entidade *Evento* e possui como atributo a descrição da mudança ocorrida e o tipo de entidade envolvida (fonte de poluição pontual ou difusa, captação ou fenômeno climatológico).

A cada ocorrência de um evento, o modelo matemático de qualidade é aplicado para se conhecer a nova condição de qualidade do rio. A entidade *Simulação* contém as informações relativas à simulação do modelo matemático de qualidade da água. Esta entidade está relacionada com as entidades *Evento*, *Bacia*, *Rio*, *Tipo Vazão* e contém os seguintes atributos: código, data de referência e descrição. Podem existir diversas simulações para a mesma bacia e o mesmo rio, bem como, pode existir mais de uma simulação para o mesmo evento, de modo que é possível assim analisar a influência de diversos fatores.

O trecho de rio é a unidade de representação da qualidade da água, adotada por este trabalho, portanto, os resultados gerados pelo modelo matemático QUAL2E em cada simulação são armazenados por trecho de rio, para cada parâmetro simulado, através do relacionamento *Qualidade Simulada*. Os atributos da *Qualidade Simulada* são o valor e a unidade do parâmetro. Através deste relacionamento é possível saber qual o valor de determinado parâmetro para qualquer trecho do rio em qualquer data cadastrada. Os constituintes que podem estar presentes em um lançamento, ou os parâmetros que são analisados em uma amostra de água, estão armazenados na entidade *Parâmetro*.

Como os elementos que influenciam na qualidade da água, as fontes de poluição e as captações de água são referenciadas espacialmente e o evento tem as informações temporais, é possível saber quando e onde ocorreram mudanças, quais

foram estas mudanças e através dos resultados do modelo de simulação qual o impacto dessas mudanças sobre a qualidade da água.

As entidades, relacionamento e atributos acima descritos são apresentados na Figura 5.10. Alguns atributos e relacionamentos foram omitidos.

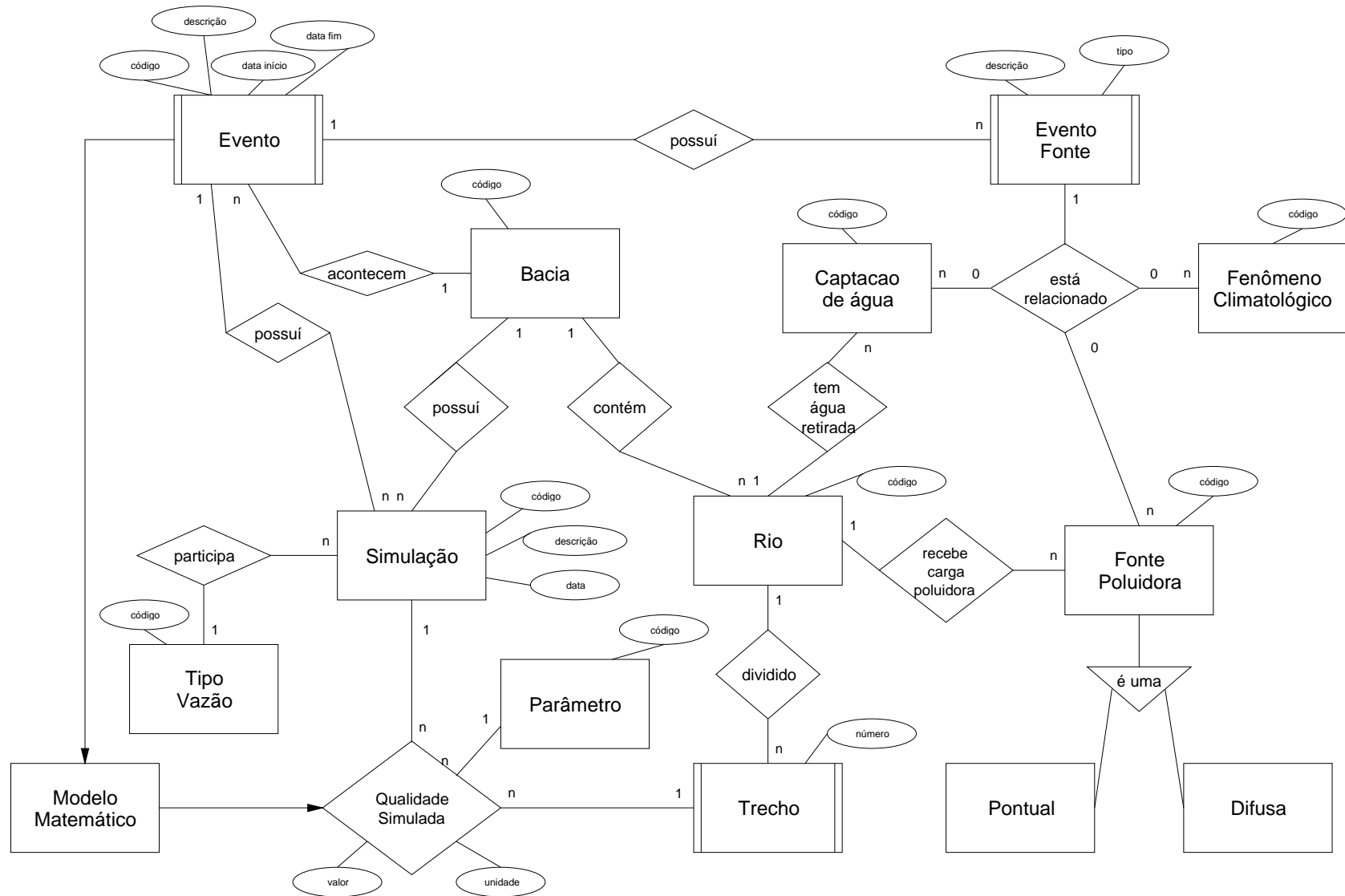
5.3.4 Diagrama das Fontes Poluidoras Pontuais

As fontes de poluição pontuais são as indústrias, os estabelecimentos comerciais e de serviços, os aterros sanitários, as estações de tratamento de esgoto e os lançamentos de esgotos *in natura*. São entidades discretas, possuem identidade e localização conhecidas, e são representadas pelo modelo de dados *objeto*. Podem ser *dados espaciais*, ou seja, entidades cujas propriedades geométricas e de localização não se alteram ao longo do tempo, como é o caso das estações de tratamento de esgoto, aterros sanitários e lançamentos de esgoto *in natura*. Ou *composições espaço-temporais*, entidades cuja localização pode se alterar ao longo do tempo, como é o caso das indústrias e de estabelecimentos comerciais e de serviços.

Todas as fontes de poluição pontuais possuem dados cadastrais (código, nome, endereço) e dados sobre seu período de existência no mundo real (data de início e fim), e algumas possuem atributos específicos, conforme descrito a seguir:

- indústria: CGC, tipo de atividade, porte da indústria, tipo de corpo receptor dos efluentes (rio, fossa, rede pública, ou desconhecido);
- aterro sanitário: nome da concessionária, tipo de resíduo, capacidade do aterro, data prevista de desativação, e nome do corpo receptor dos efluentes;
- estação de tratamento de esgoto: tipo de estação, modelo, capacidade, população atendida, e nome do corpo receptor dos efluentes;

FIGURA 5.10 – DIAGRAMA DE EVENTOS



- estabelecimentos comerciais e de serviços: CGC, tipo (hospital, restaurante, hotel, posto de combustível, supermercado), tipo de corpo receptor (rio, fossa, rede pública ou desconhecido), um indicativo da produção do estabelecimento (por exemplo, nº de leitos de um hospital, quantidade de refeições servidas por um restaurante ou número de quartos de um hotel, nº de carros lavados em um posto de combustível).

Uma fonte de poluição pontual pode possuir vários pontos de lançamento de efluentes, variando espacial e temporalmente. Por exemplo, a mesma indústria pode ter mais de um ponto de lançamento em locais distintos na mesma data, ou a carga do lançamento de uma estação de tratamento de esgoto, pode aumentar devido ao aumento da população ou pode ter a concentração de constituintes diminuídas em função da melhoria do sistema de tratamento. Ou ainda um estabelecimento comercial pode mudar de local. A fim de preservar as informações anteriores, tanto numa situação como noutra e possibilitar a existência de vários lançamentos para a mesma fonte pontual, considera-se que existe um novo ponto de lançamento a cada vez que há uma alteração.

A entidade *Lançamento Pontual* contém as informações de todos os lançamentos de efluentes realizados pelas fontes pontuais em todos os locais e datas. Possui os seguintes atributos: código, descrição, tipo (industrial, chorume, esgoto doméstico), vazão do efluente, fonte da informação (se foi medido em campo, declarado pela empresa ou estimado), indicador se é uma projeção de lançamento futuro, data de início e fim do lançamento, data da informação.

O efluente lançado pode ser tratado ou não, a entidade *Tratamento Efluentes* possui as informações sobre o tratamento dos efluentes, quando existente, que são: tipo de tratamento, vazão tratada e eficiência do tratamento (%). A entidade *Tratamento Efluentes* é uma entidade dependente da entidade *Lançamento Pontual*, não possui um identificador próprio.

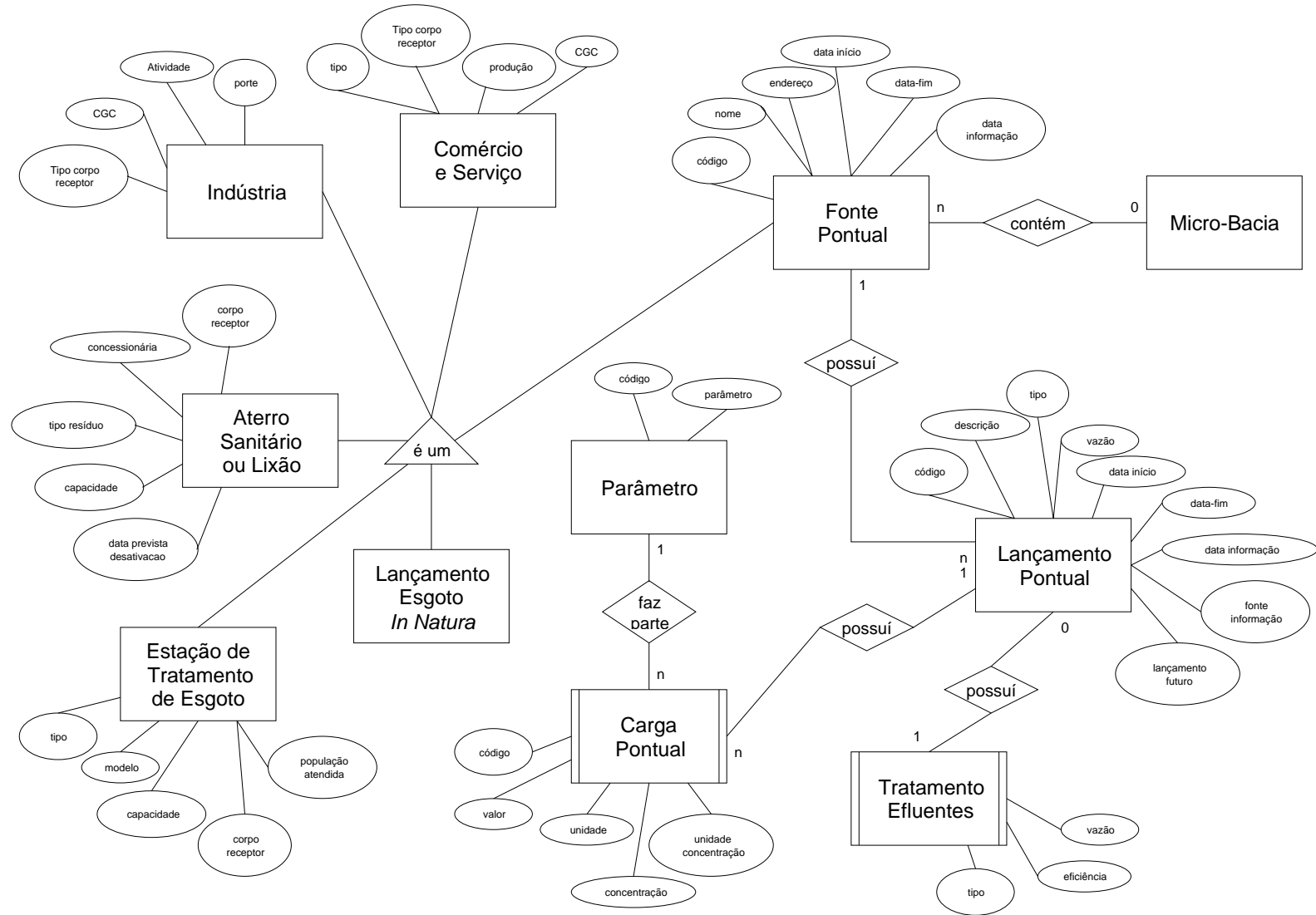
A carga gerada por um lançamento pontual é calculada multiplicando-se a vazão do efluente pela concentração dos constituintes presentes no efluente. Os constituintes presentes em cada lançamento variam em função da fonte de origem do efluente, por exemplo, um efluente gerado por uma indústria não contém os mesmos elementos que o efluente gerado por um estabelecimento comercial. Por esta razão, para cada constituinte presente no lançamento será considerada uma carga distinta, por exemplo, se no lançamento estiverem presentes, nitrito e fósforo orgânico, haverá duas cargas, uma para cada parâmetro. As informações relativas à carga são armazenadas na entidade *Carga Pontual*, que contém os seguintes atributos: código, parâmetro, valor e unidade da carga, taxa de concentração e unidade da taxa do constituinte. Desta forma uma ocorrência da entidade *Lançamento Pontual* poderá estar relacionada a várias ocorrências da entidade *Carga Pontual*. Os constituintes que podem estar presentes em um lançamento, ou os parâmetros que são analisados em uma amostra de água, estão armazenados na entidade *Parâmetro*. A entidade *Carga Pontual* é dependente da entidade *Lançamento Pontual*, e sua identificação é feita pela identificação do lançamento e do parâmetro.

Para informar as fontes pontuais ao QUAL2E é preciso relacioná-las ao elemento computacional do trecho do rio, através da micro-bacia. A Figura 5.11 apresenta o diagrama com as entidades e relacionamentos acima descritos

5.3.5 Diagramas das Fontes Poluidoras Difusas

As fontes de poluição difusas, consideradas neste trabalho, são as provenientes da população e do uso do solo. A poluição difusa gerada pela população é proveniente do esgoto gerado pela população que não é atendida por sistema de esgotamento sanitário, cujos pontos de lançamento não são conhecidos. Sendo assim, interessa saber, além da população existente em uma região em uma determinada data, qual a população atendida por sistema de esgotamento sanitário. Existem estudos que

FIGURA 5.11 - DIAGRAMA DAS FONTES POLUIDORAS PONTUAIS



determinam quais as taxas médias dos constituintes, presentes no esgoto doméstico, geradas por habitante. Para quantificar a carga poluidora gerada pela população presente em uma região em data específica, multiplica-se o número de habitantes sem atendimento pela taxa média de cada constituinte. Para aplicação do modelo QUAL2E é necessário calcular a concentração de cada parâmetro para cada trecho do rio em função da vazão considerada para a simulação.

A população varia no espaço e no tempo e normalmente é quantificada através de algum limite administrativo, como município ou bairro, ou natural, como bacia hidrográfica. Sendo assim é considerada uma *variação espaço-temporal* de um atributo de alguma entidade. Para este trabalho, os dados sobre a população serão armazenados para as micro-bacias e totalizada para os trechos de rio para o cálculo das concentrações que devem ser informadas para o QUAL2E.

No caso deste trabalho, é necessário ter a informação sobre a população para diferentes datas e também para diferentes alternativas de atendimento de população por sistema de esgotamento sanitário, para simular os efeitos das obras de saneamento previstas. Para atender este requisito identificou-se a necessidade de uma entidade *População* contendo a data e a fonte a que se refere a informação sobre a população. Assim a informação sobre a população não será armazenada como um atributo das entidades *Trecho* e *Micro-Bacia*, e sim através do relacionamento entre estas entidades e a entidade *População*. A entidade *População* possui os seguintes atributos: código, data e fonte da informação.

Os relacionamentos entre a entidade *População* e as entidades *Micro-Bacia* e *Trecho*, denominados *População Micro-Bacia* e *População Trecho* respectivamente, possuem os atributos relativos ao número de habitantes total, número de habitantes atendido e número de habitantes não atendido por sistema de esgotamento sanitário.

Da mesma maneira que existem diversos constituintes presentes em um lançamento gerado por uma fonte de poluição pontual, no esgoto doméstico também

estão presentes diversos constituintes. A carga poluidora gerada pela população sem atendimento por sistema de esgotamento sanitário é obtida pelo produto do número de habitantes sem atendimento pela taxa média de cada constituinte. Os valores médios de cada constituintes são atributos da entidade *Taxa Média População*. Esta entidade é dependente da entidade *Parâmetro*, portanto sua identificação se faz pela identificação da entidade *Parâmetro*.

As informações relativas à carga poluidora, gerada pela população, em cada data e em cada situação de atendimento por sistema de esgotamento sanitário, para cada parâmetro são armazenadas na entidade *Carga População* para cada trecho do rio. A entidade *Carga População* contém os seguintes atributos: código, valor (carga) e unidade. A unidade pode ser kg/mês, g/dia ou qualquer outra unidade compatível com o parâmetro em questão.

A taxa de concentração de cada parâmetro varia de acordo com a vazão no trecho do rio. Como o modelo prevê a existência de diferentes vazões para o mesmo trecho do rio em diferentes datas e o uso das vazões de regionalização, a concentração de cada parâmetro por trecho de rio deve ser calculada para cada vazão aplicada para simulação com o modelo QUAL2E. Essas informações são armazenadas na entidade *Concentração* que contém os seguintes atributos: taxa (concentração) e unidade de concentração. A unidade pode ser mg/l ou qualquer outra unidade compatível com o parâmetro.

A entidade *Carga População* é dependente das entidades *Trecho*, *População* e *Parâmetro*, e a identificação de uma ocorrência desta entidade é feita pela combinação da identificação das três entidades. A entidade *Concentração* é dependente da entidade *Carga População* e a identificação de uma ocorrência é feita através da identificação da entidade *Carga População*.

Portanto, o modelo proposto permite a existência de diferentes informações sobre população para diferentes datas. Também permite, para a mesma informação

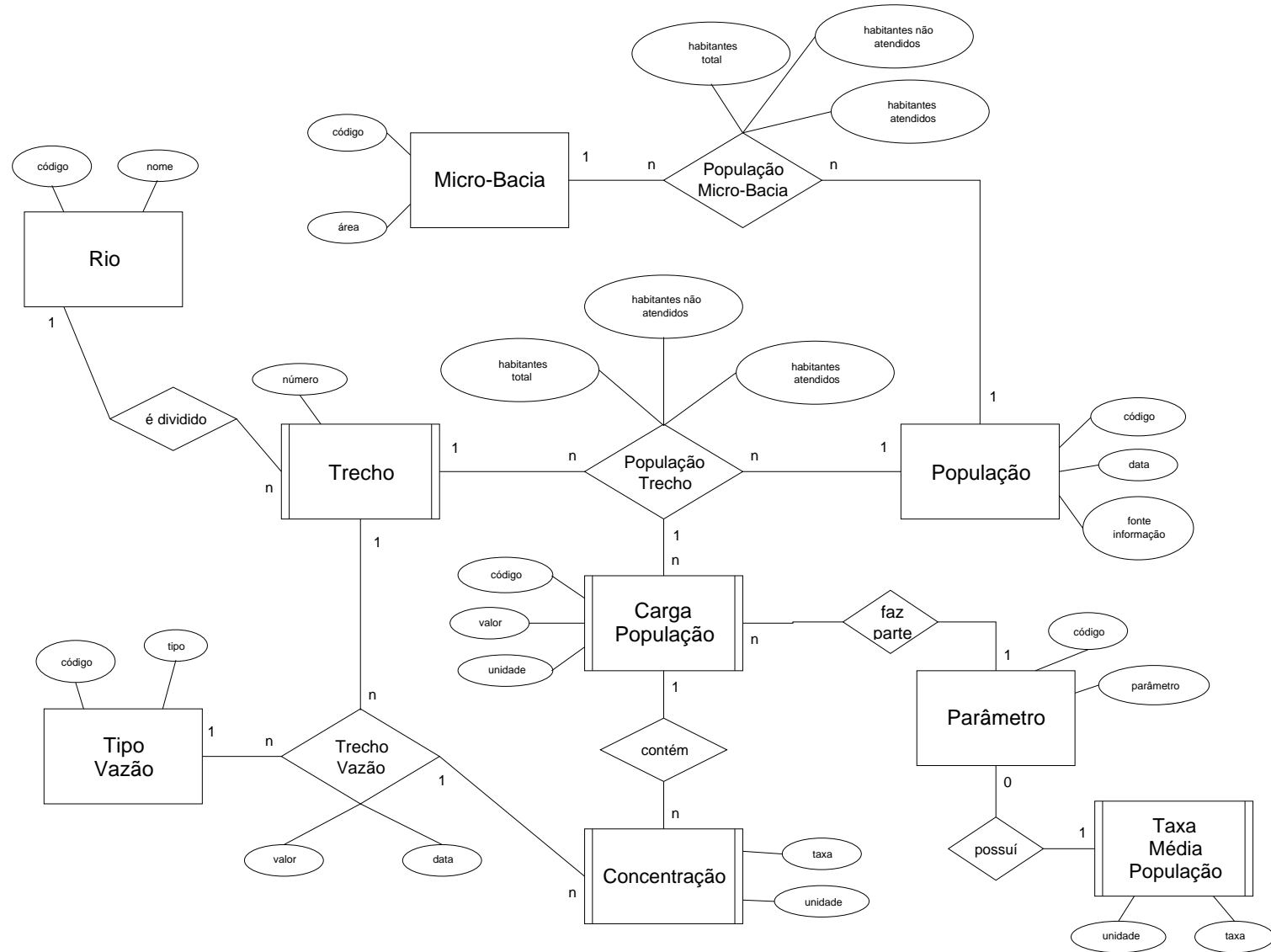
sobre população em uma data específica, diferentes situações com relação ao tratamento de esgoto doméstico. Para cada cenário de população existente, em função da data e atendimento, é possível a quantificação da carga gerada para cada constituinte presente no esgoto. Essa carga pode possuir diferentes concentrações de acordo com a vazão ocorrida em uma determinada data ou pela aplicação de uma vazão regionalizada.

A Figura 5.12 apresenta o diagrama mostrando as entidades e os relacionamentos acima descritos. Para facilitar a leitura do diagrama alguns atributos das entidades *Rio* e *Trecho* foram omitidos.

O método para determinação da carga de poluição difusa gerada pelo escoamento superficial adotado neste trabalho, o Método Simples (SCHUELER, 1987), se baseia na cobertura do solo, determinada em função do uso (residencial, urbano, industrial, agrícola), a concentração média dos poluentes presentes na água da chuva para cada tipo de cobertura do solo e a precipitação média anual.

O uso do solo é um fenômeno contínuo, delimitado pela área da bacia hidrográfica, cujos valores podem variar espacial e temporalmente. Poderia, portanto ser representado espacialmente pelo modelo de dados *campo*. No entanto uma das variáveis necessárias para o cálculo da carga poluidora, neste caso, é a área abrangida por cada tipo de cobertura de solo, e para se ter a área é necessário que as unidades estejam discretizadas. Desta forma adotou-se um modelo de representação *objeto*. Como as unidades se modificam entre duas datas distintas, sempre que houver um novo mapeamento do uso do solo, todo o cenário da bacia será novamente registrado, assim a diferença entre duas datas só poderá ser obtida de forma implícita. Optou-se por esta representação porque o objetivo pretendido não é determinar o melhor modelo para a representação desta variável.

FIGURA 5.12 - DIAGRAMA DAS CARGAS POLUIDORAS DIFUSAS PROVENIENTES DA POPULAÇÃO



Assim sendo, a entidade *Uso Solo* contém os seguintes atributos: código, unidade, data de referência e área. A informação sobre a classe do uso do solo está disponível através do relacionamento com a entidade *Classe Uso Solo*, que contém o código e a descrição do tipo de uso do solo.

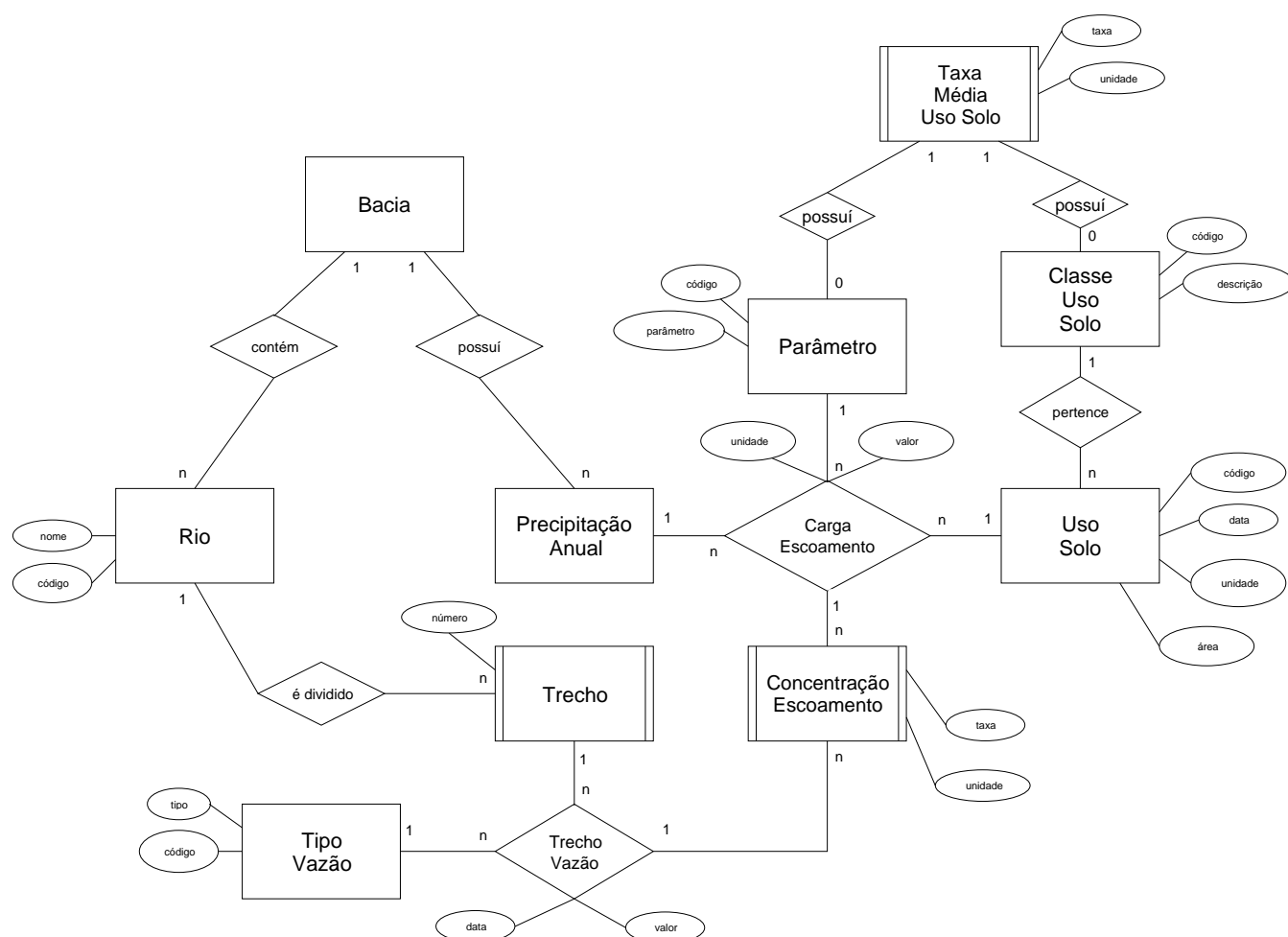
A concentração média de poluentes presentes na água do escoamento superficial por tipo de cobertura de solo é obtida a partir de estimativas de dados regionais para cada parâmetro. A entidade *Taxa Média Uso Solo* contém a concentração média por classe de uso do solo e por parâmetro, com os seguintes atributos: taxa (concentração) e unidade relativa ao parâmetro. A *Taxa Média Uso Solo* é dependente das entidades *Parâmetro* e *Classe Uso Solo* e a identificação de uma ocorrência desta entidade é feita pela identificação das entidades *Parâmetro* e *Classe Uso Solo*. A entidade *Precipitação Anual* contém o valor da precipitação anual média por bacia.

Similarmente as outras fontes de poluição, existem diversos poluentes presentes no escoamento superficial. Sendo assim a carga poluidora deve ser calculada para cada poluente. O cálculo da carga é feito multiplicando-se a área das unidades de uso do solo pelo valor da precipitação anual, e a concentração do poluente para o tipo de cobertura do solo. As informações relativas a carga poluidora é então obtida a partir do relacionamento entre as entidades *Uso Solo*, *Precipitação Anual* e *Parâmetro*. Este relacionamento, denominado *Carga Escoamento* contém como atributos o valor e a unidade da carga poluidora.

A taxa de concentração de cada parâmetro varia de acordo com a vazão no trecho do rio. Como o modelo prevê a existência de diferentes vazões para o mesmo trecho do rio em diferentes datas, e o uso das vazões de regionalização, a concentração de cada parâmetro por trecho de rio deve ser calculada para cada vazão aplicada para simulação com o modelo QUAL2E. Essas informações são armazenadas na entidade *Concentração Escoamento* que contém os seguintes atributos: taxa (concentração) e

unidade de concentração. A entidade *Concentração Escoamento* é dependente da entidade *Trecho* e do relacionamento *Carga Escoamento*. O diagrama mostrando as entidades e os relacionamentos acima descritos é apresentado na Figura 5.13. Alguns atributos e relacionamentos entre as entidades foram omitidos para facilitar a leitura do diagrama.

FIGURA 5.13 – DIAGRAMA DAS CARGAS POLUENTES DIFUSAS GERADAS PELO ESCOAMENTO SUPERFICIAL

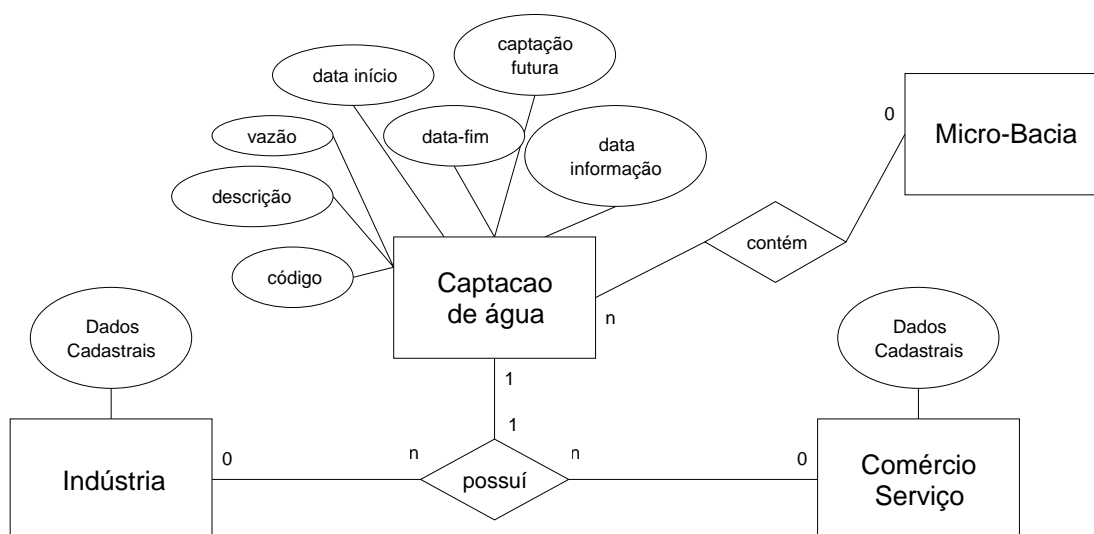


5.3.6 Diagrama das Captações de Água

Seguindo o mesmo raciocínio empregado para o lançamento de efluentes, uma mesma indústria ou estabelecimento comercial ou de prestação de serviços pode possuir mais de uma captação, em locais, datas ou quantidades diferentes. Portanto, da mesma forma que a entidade *Lançamento Pontual*, a entidade *Captação* contém informações de todas as retiradas feitas no rio.

A captação é uma entidade discreta, possui identidade e localização conhecida, e suas propriedades geométricas não se alteram ao longo do tempo, e, portanto é um *dado espacial*. Os atributos da entidade *Captação* são: código, descrição, vazão captada, data de início e fim, data da informação e indicador se é uma captação prevista para o futuro. Para que as informações das captações possam ser informadas ao QUAL2E é preciso relacioná-las ao elemento computacional do trecho do rio, através da micro-bacia. A Figura 5.14 apresenta o diagrama com as entidades e relacionamentos acima descritos. Alguns atributos e relacionamentos foram propositalmente omitidos para facilitar a leitura do diagrama.

FIGURA 5.14 – DIAGRAMA DAS CAPTAÇÕES

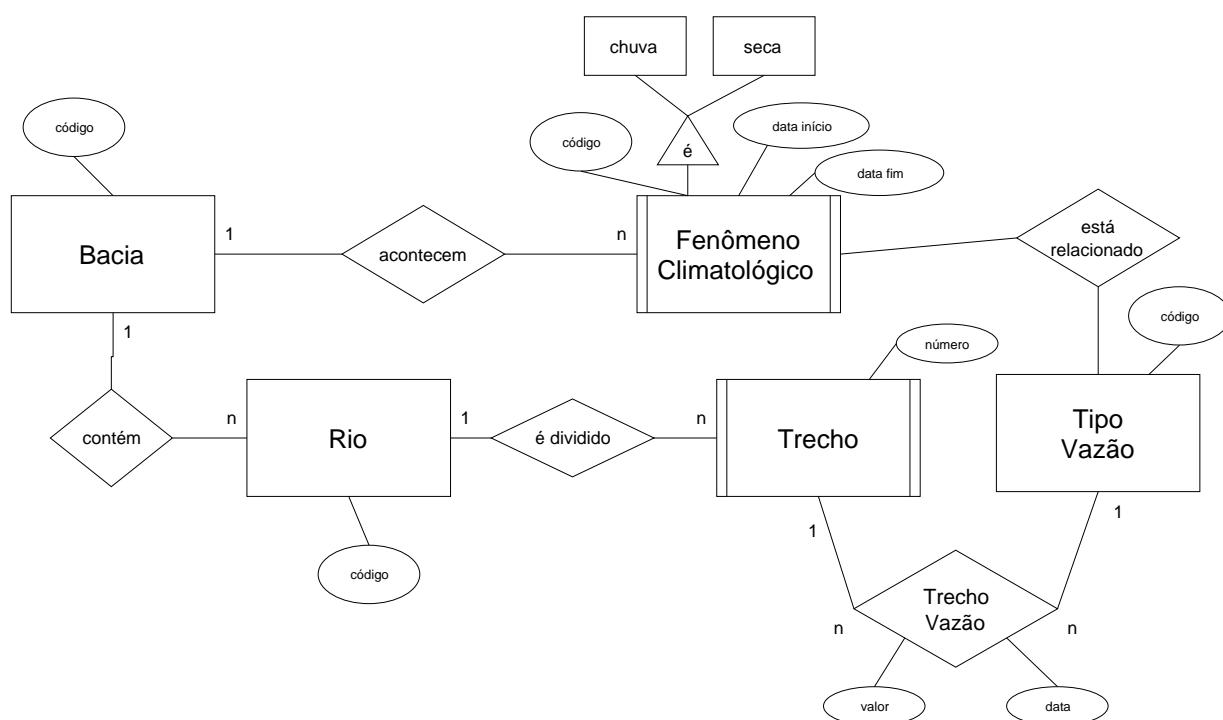


5.3.7 Diagrama dos Fenômenos Climatológicos

Os fenômenos climatológicos que acontecem em uma bacia hidrográficas são representados no modelo proposto pela entidade *Fenômeno Climatológico*. Os fenômenos climatológicos podem ser de dois tipos: seca e chuva. Os atributos da entidade *Fenômeno Climatológico* são código, data de início e fim. A influência do fenômeno sobre a quantidade da água é armazenada através da relação entre a entidade *Fenômeno Climatológico* e a entidade Tipo Vazão. A cada ocorrência de um fenômeno climatológico será gerada uma ocorrência na entidade Tipo Vazão, registrando a vazão do rio relativa àquele fenômeno, e os valores relativos a esta vazão através do relacionamento *Trecho Vazão*.

A Figura 5.15 apresenta as entidades e relacionamentos acima descritos.

FIGURA 5.15 – DIAGRAMA DOS FENÔMENOS CLIMATOLÓGICOS



5.3.8 Diagrama das Estações de Monitoramento

As informações das medidas dos parâmetros hidrológicos e de qualidade da água realizados em campo estão disponíveis para consulta no modelo, através das estações de monitoramento. Estas informações foram disponibilizadas no modelo apenas com o objetivo de realizar comparações com os dados gerados pelo modelo QUAL2E e verificação pontual de vazões e precipitação. Não está prevista no modelo proposto a interpolação destes valores para toda a bacia hidrográfica, pois não faz parte do escopo deste trabalho.

A estação de monitoramento é uma entidade discreta, possui identidade e localização definida, e pode ser considerada um *dado espacial*, ou seja, suas propriedades geométricas e localização não se alteram ao longo do tempo. A estação de monitoramento é representada espacialmente pelo modelo de dados *objeto*.

Os tipos de estação de monitoramento consideradas neste trabalho são pluviométrica, fluviométrica e de qualidade da água. A entidade *Estação Monitoramento* possui as informações cadastrais das estações: código, nome, data da instalação e extinção. Os valores medidos em campo são armazenados em três entidades distintas pois as informações diferem para cada tipo de estação.

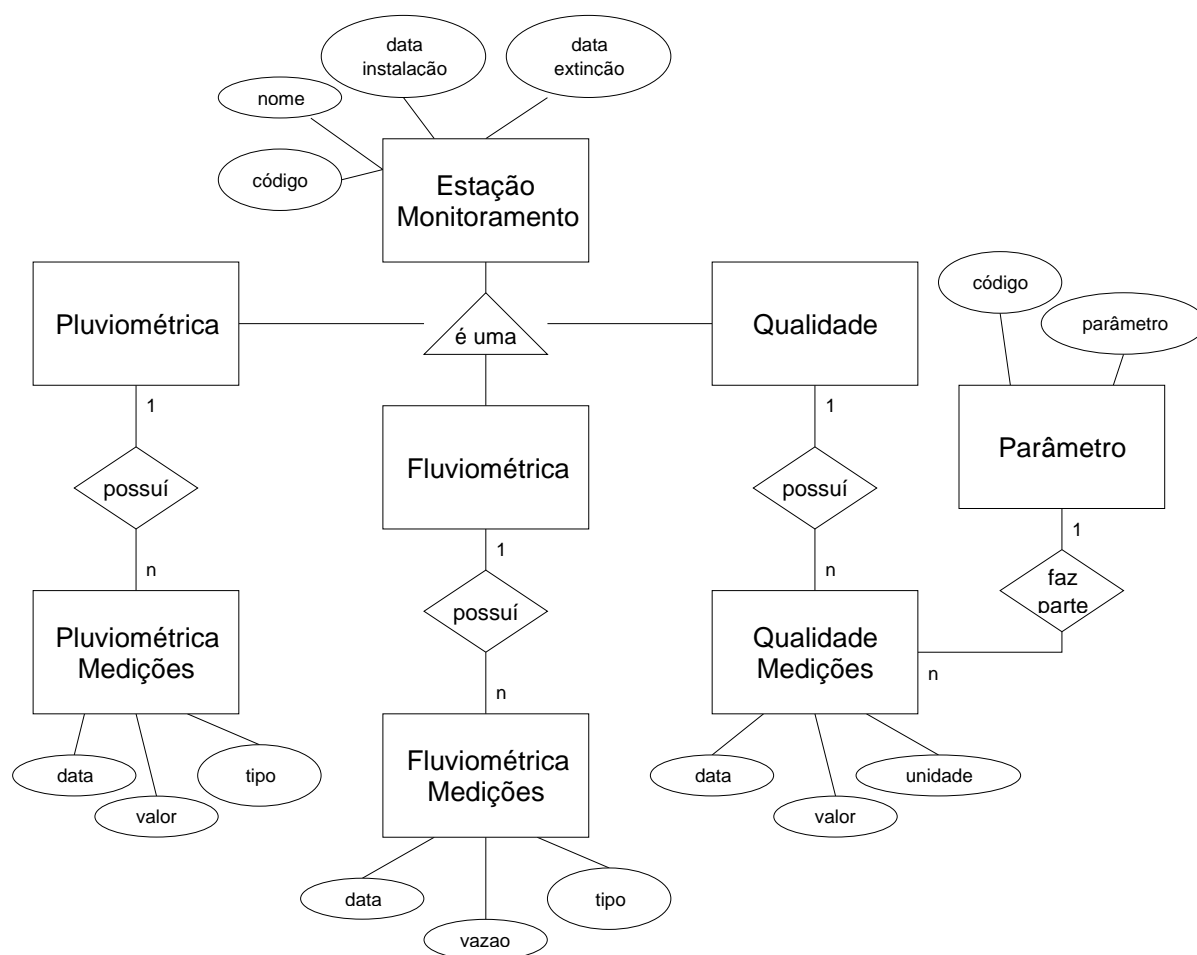
A entidade *Pluviométricas Medições* tem os valores de precipitação medidos em campo em diferentes datas, ou os valores médios calculados por estação. A entidade contém os seguintes atributos: data, valor (em mm) e tipo (se medida em campo, ou média mensal, anual, diária).

Da mesma forma a entidade *Fluviométricas Medições* contém os valores de vazão medidos em campo em diferentes datas, ou os valores médios calculados por estação. Fazem parte da entidade, os seguintes atributos: data, vazão (m^3/s) e tipo (medida ou médias e máximas anuais ou mensais).

A entidade *Qualidade Medida* possui as concentrações dos parâmetros de qualidade da água das amostras coletadas em campo e analisadas em laboratório. A informação sobre o parâmetro vem do relacionamento com a entidade *Parâmetro*. A entidade *Qualidade Medida* contém os seguintes atributos: data, valor e unidade.

As entidades, relacionamentos e atributos acima descritos são apresentados no diagrama a seguir, na Figura 5.16.

FIGURA 5.16 – DIAGRAMA DAS ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO



5.3.9 Diagrama Dados Específicos do Modelo QUAL2E

É possível também armazenar no modelo espaço-temporal, os parâmetros de calibração, coeficientes e taxas utilizados pelo modelo QUAL2E, a fim de facilitar a consulta aos dados utilizados em cada simulação. Este trabalho prevê a utilização do QUAL2E em regime permanente, pois o objetivo do modelo espaço-temporal proposto é demonstrar como a qualidade da água se comportou ao longo do tempo considerando o impacto causado pelos diversos agentes poluidores em uma bacia hidrográfica. Portanto, não serão tratadas aqui as variáveis referentes à aplicação do modelo QUAL2E em regime dinâmico.

As informações são relativas a temperatura, dados hidráulicos, taxas de reação dos constituintes, dados climatológicos. Alguns desses parâmetros, os coeficientes de evaporação e fatores de correção de temperatura são considerados constantes pelo QUAL2E para todos os trechos do rio. Os dados climatológicos podem ser constantes para toda a simulação ou variar por trecho. Já os dados hidráulicos (seções transversais ou dados hidráulicos medidos) e constantes de reação variam por trecho. Foram identificadas oito entidades distintas de dados específicos do QUAL2E.

A entidade *Informações Gerais* possui os dados sobre a localização geográfica da bacia (latitude, longitude, meridiano padrão, altitude), coeficiente de atenuação, coeficientes de evaporação (AE, BE) e um indicador do tipo de dados climatológicos que serão usados, se dados globais ou por trecho do rio. Esta entidade é dependente da entidade *Simulação*, e sua identificação é feita pela identificação da simulação.

A entidade *Dados Climatológicos Globais* contém os seguintes atributos: radiação solar, nuvens, temperatura (com ou sem chuva), pressão barométrica e velocidade do vento. Se a opção dados climatológicos globais for escolhida esses valores serão aplicados para todos os trechos do rio. A entidade *Dados Climatológicos Globais* é dependente da entidade *Simulação*.

A entidade *Fatores Correção Temperatura* possui os seguintes atributos: taxas de decaimento de DBO, de nitrogênio orgânico, de amônia, de nitrito, de fósforo orgânico, de coliformes e do constituinte não conservativo, taxas de assentamento (settling) de DBO, de nitrogênio orgânico, de fósforo orgânico, de algas, e do constituinte não conservativo, OD reaeração, consumo de OD pelo sedimento, fonte de amônia, de fósforo dissolvido e de constituinte não conservativo e taxa de crescimento e respiração de algas. Para facilitar a leitura do diagrama, esses atributos serão mostrados por grupos: taxas de decaimento, taxas de assentamento, fonte, OD reaeração, consumo de OD pelo sedimento e taxas de algas. Essas constantes são aplicadas para todos os trechos do rio, portanto essa entidade é dependente da entidade *Simulação*.

A entidade *Dados Hidráulicos* contém as informações das seções transversais, que são: constante dispersão, relevo lateral 1, relevo lateral 2, largura, relevo e coeficiente de manning. Esses valores variam para cada trecho do rio, sendo assim, a entidade *Dados Hidráulicos* é dependente das entidades *Simulação* e *Trecho*.

A entidade *Dados Hidráulicos Méd* contém os seguintes atributos: Q_Coef_Vel, Q_Exp_Vel, Q_Coef_Profundidade, Q_Exp_Profundidade. Esses valores também variam de um trecho para outro do rio, quando informados. A entidade *Dados Hidráulicos Méd* é dependente da entidade *Simulação* e *Trecho*.

Embora ambas as entidades *Dados Hidráulicos* e *Dados Hidráulicos Méd* tratam de informações hidráulicas, optou-se por criar duas entidades, pois nem sempre são fornecidos todos os dados em uma mesma simulação. Desta forma, otimiza-se o banco de dados, sendo que ambas as entidades podem ser utilizadas ao mesmo tempo.

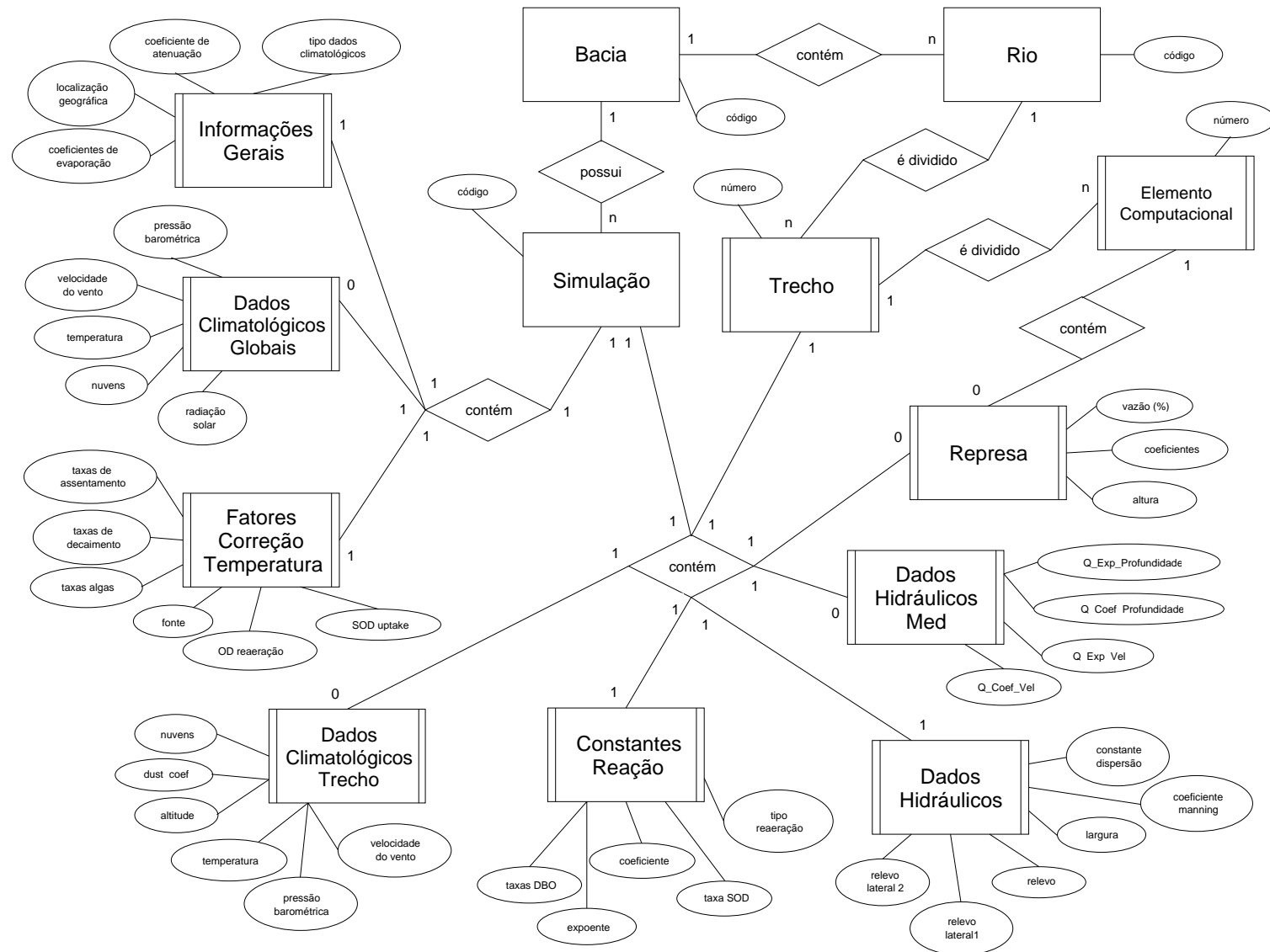
A entidade *Dados Climatológicos Trecho* contém os seguintes atributos: altitude, dust_coef, nuvens, temperatura (com ou sem chuva), pressão barométrica, velocidade do vento, para cada trecho do rio. Esses valores são requeridos se a opção dados climatológicos por trecho de rio for escolhida, sendo que essa entidade é dependente das entidades *Simulação* e *Trecho*.

A entidade *Constantes Reação* contém os seguintes atributos: taxa de decaimento e assentamento de DBO, taxa SOD, tipo e coeficiente de reaeração, coeficiente, expoente. Esses dados são relativos à cada trecho do rio, dessa forma, essa entidade é dependente das entidades *Simulação* e *Trecho*.

Se existir uma represa no rio modelado, as informações sobre a mesma serão armazenadas na entidade *Represa*, que contém os seguintes atributos: altura, vazão (%), coeficientes (ADAM, BDAM). A entidade *Represa* é dependente das entidades *Simulação* e *Trecho*. É necessário saber também qual o elemento computacional relativo à localização da represa.

O diagrama apresentado na Figura 5.17 mostra as entidades, relacionamentos e atributos acima descritos. Alguns atributos das entidades *Simulação*, *Rio*, *Trecho* e *Bacia* foram omitidos para dar maior clareza ao diagrama.

FIGURA 5.17 - DIAGRAMA DOS DADOS ESPECÍFICOS DO QUAL2E



6. IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO ESPAÇO-TEMPORAL

6.1. DADOS UTILIZADOS

Os dados utilizados para compor a matriz das fontes de poluição da bacia e a base cartográfica foram provenientes do projeto “Avaliação de Benefício-Custo de Medidas de Controle de Cheias e Despoluição Urbana – Estudo de caso da Bacia do Rio Barigüi”, do projeto Cadastro de Usos e Usuários de Recursos Hídricos da Bacia do Alto Iguaçu (SUDERHSA, 1999), do Sistema de Informações Geográficas para Gestão de Recursos Hídricos (SUDERHSA, 2004), do Cadastro de Indústrias de Curitiba (IPPUC, 2003) e do Censo de 1996 (IBGE).

6.1.1 Projeto Barigüi

Este projeto foi realizado com o objetivo de avaliar o impacto das obras de saneamento que a SANEPAR pretende executar na bacia. O projeto prevê a instalação de três novas estações de tratamento de esgoto, ampliação da capacidade de duas estações já em funcionamento, desativação de RALFs (Reatores Anaeróbicos de leito Fluidizado) antigos e ampliação da rede coletora de esgoto, entre 2005 e 2020. Para avaliar o impacto dessas obras, esse projeto calibrou o modelo QUAL2E para a data atual, e simulou cenários de projeção populacional para 2005, 2010, 2015 e 2020, para diferentes vazões regionalizadas.

No projeto dividiu-se a bacia em 22 sub-bacias que correspondem aos trechos do rio com 106 elementos computacionais de igual comprimento (1 km), conforme mostra a Figura 4.2. Esta divisão foi feita de acordo com as exigências impostas pelo modelo QUAL2E.

Este projeto dispõe de dados de população, vazões de regionalização para todos os trechos e elementos computacionais do rio, além de dados das indústrias utilizadas nas simulações. Todos os dados de calibração do QUAL2E utilizados neste trabalho foram provenientes deste projeto, bem como a informação de população e vazão.

6.1.2 Cadastro de Usos e Usuários de Recursos Hídricos da Bacia do Alto Iguaçu

O Cadastro de Usos e Usuários de Recursos Hídricos da Bacia do Alto Iguaçu⁷ (SUDERHSA, 1999) teve por objetivo a definição do cadastro das captações de água bruta superficial e subterrânea e dos lançamentos de efluentes nos corpos d'água, na ótica de definir o universo dos Usuários de Recursos Hídricos, e subsidiar a autoridade competente na futura cobrança pelo uso da água. Os usuários que constaram do cadastro, fazem parte das seguintes categorias: indústrias, comércio e serviços (hospitais, hotéis e motéis, restaurantes, postos de combustível, atividades comerciais relevantes), serviços de água e esgoto (captações de água, estações de tratamento - ETEs e RALFs), condomínios e aterros.

Neste projeto foi realizado um levantamento dos principais empreendimentos poluidores da bacia, por ramo de atividade, e dentre estes empreendimentos selecionou-se uma amostra para visitar e coletar dados de campo para análise. Para definição das cargas poluidoras relativas a cada empreendimento, a metodologia aplicada baseia-se no cálculo da vazão dos efluentes dos empreendimentos visitados e na extrapolação, destas vazões para os demais, através da aplicação de correlação entre volume de água captado e volume de efluentes lançados, para cada ramo de atividade.

⁷ O Cadastro de Usos e Usuários de Recursos Hídricos da Bacia do Alto Iguaçu será referenciado nos textos seguintes como Cadastro de usuários

Os dados relativos às indústrias, comércio, serviços, lançamentos de esgoto *in natura*, estações de tratamento de esgoto utilizados neste trabalho foram provenientes deste projeto.

6.1.3 Sistema de Informações Geográficas para Gestão de Recursos Hídricos

Este sistema, doravante denominado SIG-SUDERHSA, foi desenvolvido e implantado pela SUDERHSA em 2002, e é o sistema de apoio à decisão no gerenciamento de recursos hídricos no Estado do Paraná. O sistema possui módulos para o gerenciamento integrado do cadastro de usos e usuários de recursos hídricos, que subsidia a concessão de outorgas (para o direito de uso da água), e de informações hidrológicas.

Está implantada neste sistema uma base cartográfica da Bacia do Alto Iguaçu na escala 1:10.000, ano 2000, além de dados de uso do solo, mapeamento geológico geotécnico, infraestrutura e serviços, informações sócioeconômicas e de legislação.

A base de dados cartográfica, informações cadastrais e de captação de água, dados de monitoramento de estações hidrológicas e de qualidade da água utilizadas neste trabalho foram oriundas deste sistema.

O cadastro de indústrias do IPPUC foi utilizado para complementar as informações que não estavam disponíveis no cadastro da SUDERHSA, principalmente informações relativas à data de abertura das indústrias.

6.2. PREPARAÇÃO DOS DADOS

Será apresentada a seguir a composição da base de dados por tipo de informação geográfica. Os diferentes tipos de informação geográfica, neste trabalho, são as entidades do modelo E-R que têm representação espacial.

6.2.1 Bacia e Micro-Bacias

O limite da bacia do rio Barigüi utilizado é o limite definido pela SUDERHSA, com área de 265 km². As micro-bacias foram redefinidas a partir do arquivo fornecido pelo projeto Barigüi, para ficar compatíveis com a base da SUDERHSA. A redefinição foi necessária devido à diferença de escala da base cartográfica da SUDERHSA, 1:10.000, e a usada pelo projeto Barigüi, 1:50.000. Além de compatibilidade com a base cartográfica utilizada, esta adaptação dos limites das micro-bacias é importante, pois é por meio das micro-bacias que os dados das cargas de poluição, tanto pontual quanto difusa, são informadas ao QUAL2E.

Desta forma, as micro-bacias foram delimitadas inicialmente com o uso do aplicativo de delimitação automática do SIG SUDERHSA no ArcView, e editadas para ficarem compatíveis com a base original do Projeto Barigüi. A delimitação feita pelo projeto Barigüi não obedece somente os critérios físicos de bacia, considera também as características hidráulicas do trecho do rio e distribuição de população, além de englobar as áreas de contribuição direta do rio Barigüi.

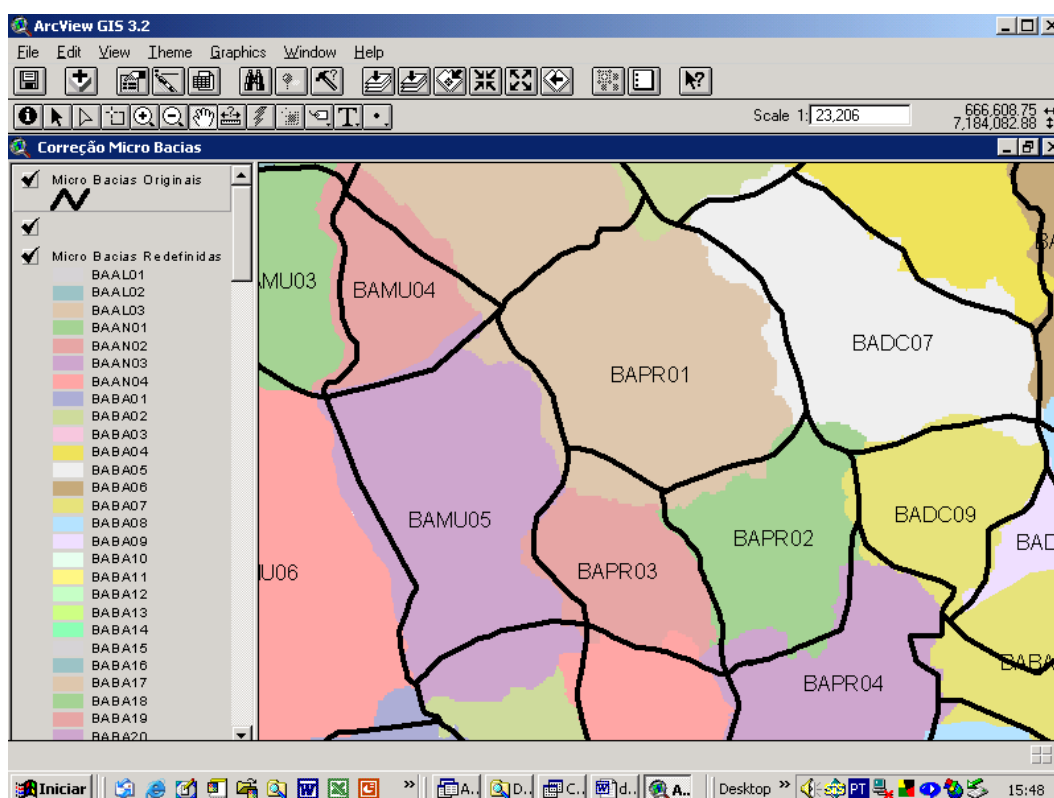
Cada micro-bacia recebeu um código identificador de acordo com a nomenclatura adotada pelo Projeto Barigüi para as sub-bacias:

- Barigüi norte	BANO
- Barigüi	BABA
- Barigüi – margem direita A	BADA
- Barigüi – margem direita B	BADB
- Tanguá	BATA
- Uvu	BAOV
- Cascatinha	BACA
- Arthur Lacerda	BAAL
- Bariguizinho	BABZ
- Barigüi – margem direita C	BADC
- Vieira Fazenda	BAVF
- Portão	BAPO
- Oswaldo Cruz	BAOC
- Vila Formosa	BAFO
- Patrício	BAPR
- Mueller	BAMU
- Fatima Bark	BAFB

- | | |
|-------------------|------|
| - Capão Raso | BACR |
| - Passo do França | BAPF |
| - Contorno | BACO |
| - Andrade | BAAN |
| - Ordem | BAOR |

A Figura 6.1 mostra as micro-bacias ajustadas, representadas pelas áreas coloridas, e a delimitação original do Projeto Barigüi, representada pelas linhas pretas.

FIGURA 6.1– MICRO BACIAS AJUSTADAS



6.2.2 Rios e Trechos de Rio

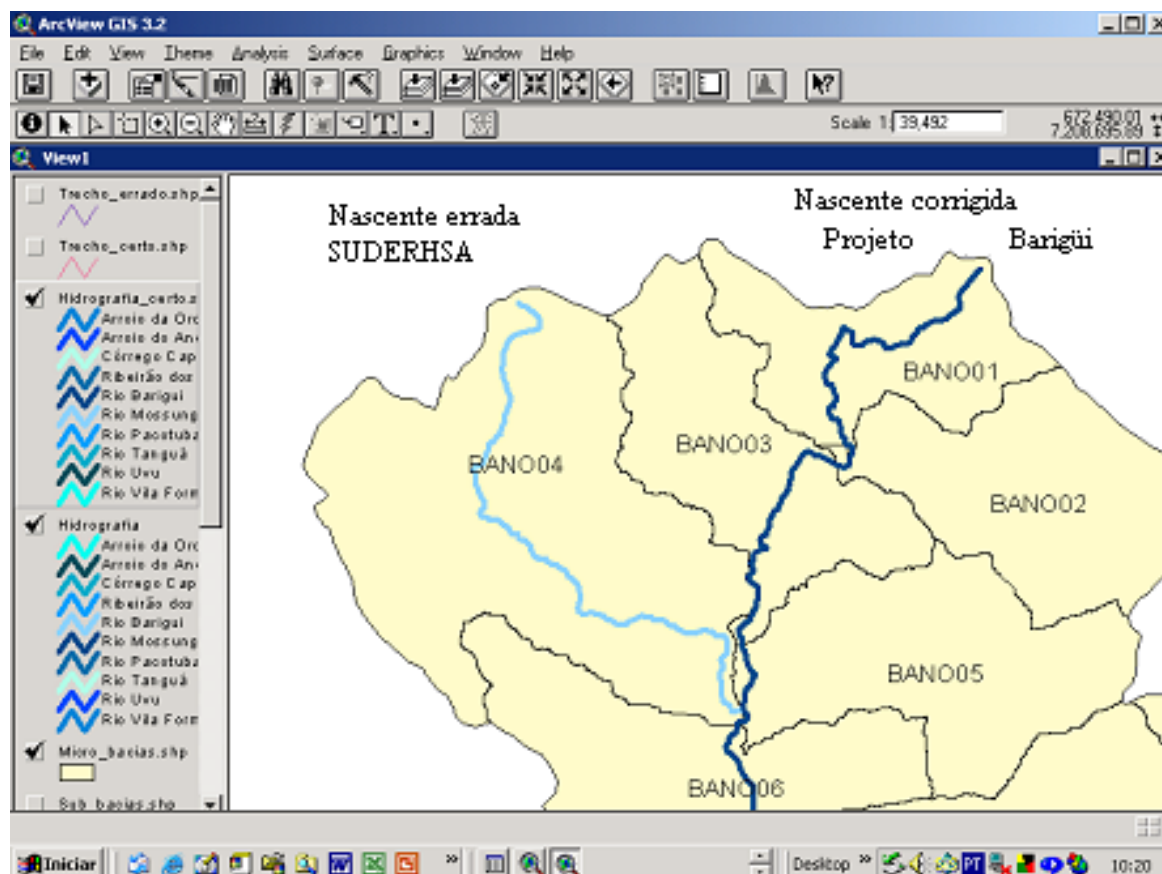
No projeto Barigüi dividiu-se o rio, inicialmente em 22 trechos, mas durante o processo de aplicação do QUAL2E, utilizou-se somente 19 trechos, não foram modelando os trechos relativos às sub-bacias do rio Pacotuba, Tanguá e Uvu.

Para utilização neste trabalho, os 19 trechos foram criados a partir da base de hidrografia do SIG-SUDERHSA e das micro-bacias já delimitadas, considerando o

limite de cada sub-bacia, de acordo com os trechos já definidos no Projeto Barigüi. Durante esta fase verificou-se incompatibilidade entre as nascentes do rio Barigüi definidas no SIG-SUDERHSA e as informações das micro-bacias correspondentes ao trecho 1 definidas pelo Projeto Barigüi. Pelos dados do projeto Barigüi o início do primeiro trecho, ou seja, da nascente do Barigüi corresponde a micro-bacia BANO01, e de acordo com a base cartográfica da SUDERHSA, o primeiro trecho do rio corresponde a micro-bacia BANO04, conforme mostra a Figura 6.2.

Para identificar o erro foi realizada uma visita ao local conhecido como nascente do Barigüi e coletadas as coordenadas via GPS. Com base nesta visita foi possível identificar que o erro estava na base cartográfica da SUDERHSA. Os dados foram corrigidos como mostra a Figura 6.2. A base de rios e trechos final está apresentada na Figura 6.3, e as características dos trechos no Quadro 6.1.

FIGURA 6.2– CORREÇÃO DAS NASCENTES DO BARIGÜI NA BASE DA SUDERHSA



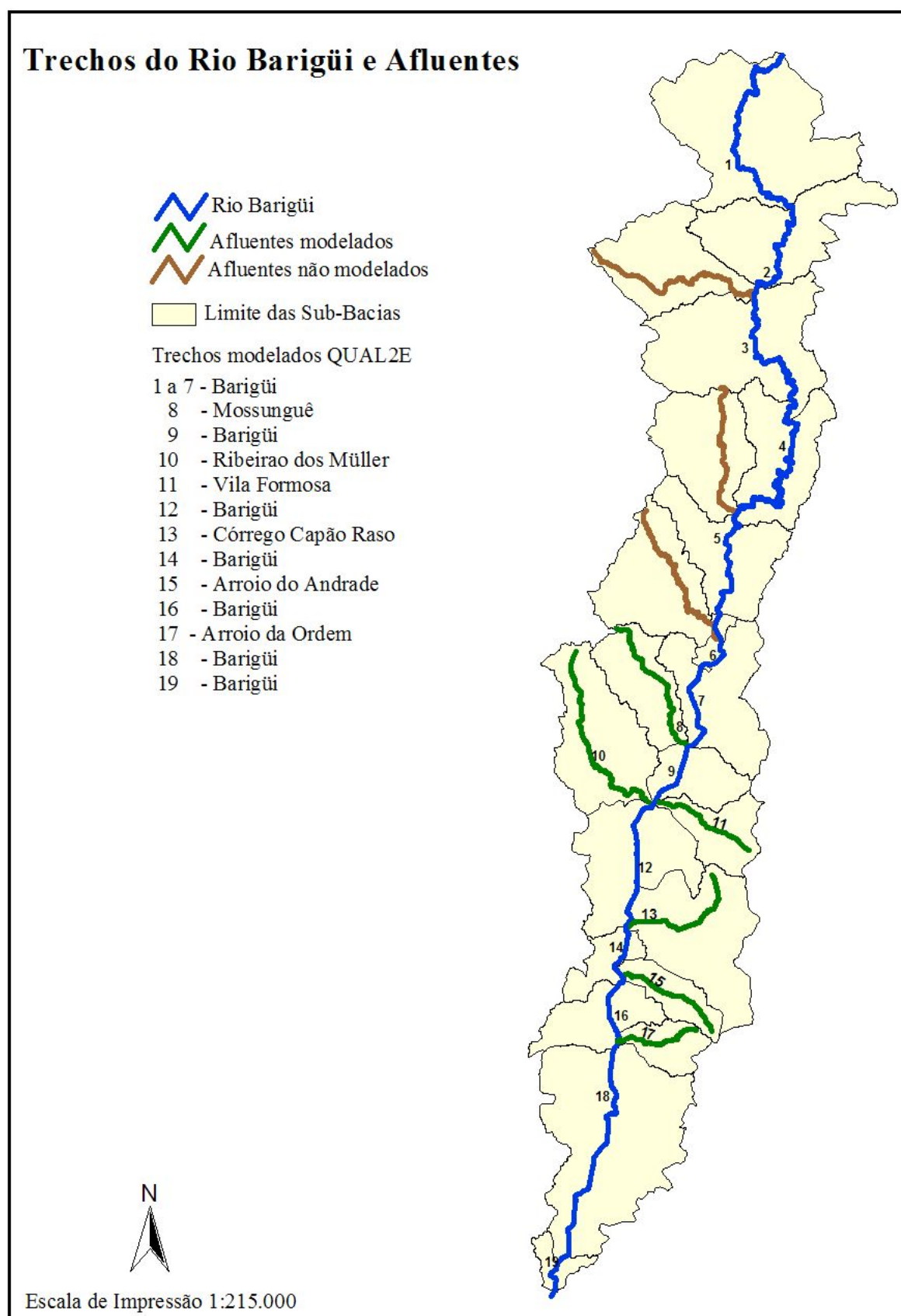
QUADRO 6.1 – TRECHOS DO BARIGÜI E AFLUENTES

N. TRECHO	NOME	KM INICIAL	KM FINAL	CABECEIRA	NUMERO DE ELEMENTOS COMPUTACIONAIS
1	Rio Barigui	67	59	x	8
2	Rio Barigui	59	54		5
3	Rio Barigui	54	48		6
4	Rio Barigui	48	40		8
5	Rio Barigui	40	34		6
6	Rio Barigui	34	32		2
7	Rio Barigui	32	28		4
8	Rio Mossunguê	5	0	x	5
9	Rio Barigui	28	25		3
10	Ribeirão dos Müller	7	0	x	7
11	Rio Vila Formosa	5	0	x	3
12	Rio Barigui	25	21		4
13	Córrego Capão Raso	7	0	x	6
14	Rio Barigui	21	18		3
15	Arroio do Andrade	4	0	x	4
16	Rio Barigui	18	15		3
17	Arroio da Ordem	3	0	x	3
18	Rio Barigui	15	3		12
19	Rio Barigui	3	0		3

6.2.2.1 Vazões

Os dados de vazão por trecho utilizados no modelo foram provenientes do Projeto Barigüi, informados no relatório parcial 1. Foram utilizadas as vazões regionalizadas de estiagem Q5,30, Q10,7, a vazão média de longo período Qmlp, e as vazões médias de 90% e 80 % de permanência, Q90 e Q80. Além disso foi utilizada a vazão medida em campo, relativa a um evento de chuva ocorrido no dia 13/05/2004.

FIGURA 6.3 – TRECHOS DO RIO BARIGÜI E AFLUENTES



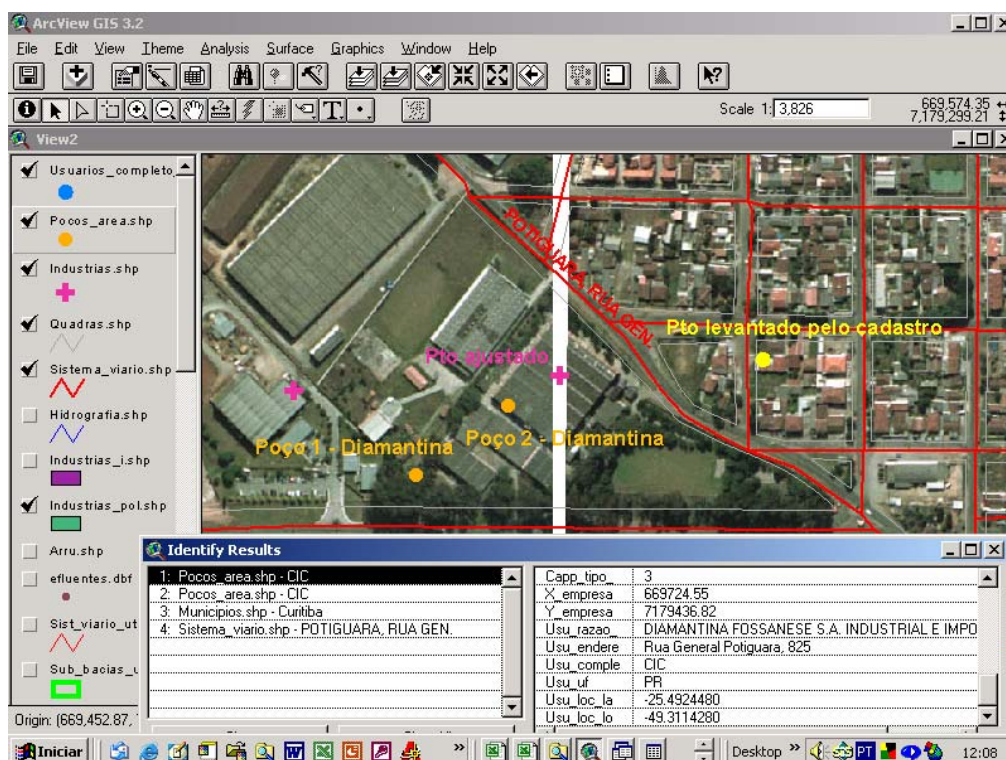
FONTE: SUDERHSA (2000) / Projeto Barigüi (2004)

6.2.3 Indústrias

Para compor o universo das indústrias poluidoras na bacia do Barigüi foram inicialmente selecionadas as 100 maiores indústrias levantadas pelo Cadastro de Usuários. Dessas 100 indústrias apenas as que foram visitadas em campo (21 indústrias) possuíam as coordenadas de localização, e estavam cadastradas no SIG-SUDERHSA.

Ao fazer o posicionamento dessas indústrias na base cartográfica foi verificado um deslocamento dos pontos em relação às ruas e quadras. Para fazer o ajuste e posicionar corretamente as indústrias na base cartográfica, foram utilizados como referência os pontos de captação de água (superficial ou subterrânea) e o endereço da indústria cadastrados no SIG-SUDERHSA, a base de quadras e ruas (escala 1:10.000) e as ortofotos (escala 1:20.000) disponibilizados pelo SIG-SUDERHSA, conforme ilustrado na Figura 6.4. Neste exemplo, a localização da indústria Diamantina Fossanese, foi realizada a partir dos pontos de 2 poços existentes para esta indústria e a visualização das construções através das ortofotos.

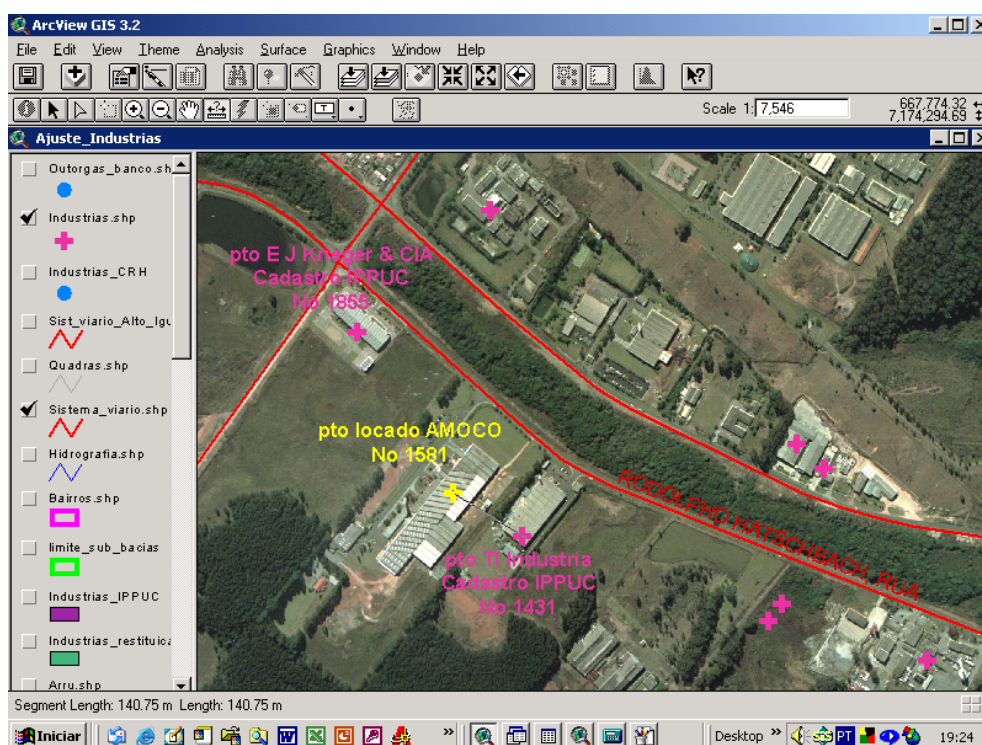
FIGURA 6.4 – AJUSTE DAS COORDENADAS DAS INDÚSTRIAS



No intuito de localizar as outras indústrias, foi solicitado ao IPPUC o cadastro georeferenciado das indústrias de Curitiba para a bacia do Barigüi e realizado um cruzamento das indústrias que não possuíam coordenadas. Não foi possível identificar um campo de ligação entre os dois cadastros, pois no cadastro do IPPUC a indústria é referenciada pelo nome do contribuinte e indicação fiscal e no Cadastro de Usuários pela razão social e CGC. Foi possível localizar 19 indústrias coincidentes pelo nome ou endereço, e ramo de atividade.

A localização das outras 60 indústrias do Cadastro de Usuários foi feita através do endereço, a partir da base cartográfica e ortofotos, usando como referência os endereços das indústrias cadastradas pelo IPPUC. Através das indústrias localizadas na mesma rua, foi feito o posicionamento pelo número do imóvel. A Figura 6.5 mostra como foi localizada a AMOCO do Brasil, cujo endereço é Rua Rodolpho Hatschbach, 1581. Nesta mesma rua existiam no cadastro do IPPUC, dentre outras, a indústria JK Krieger, localizada no número 1855 e TI Brasil, localizada no número 1431. Logo, a AMOCO foi localizada entre essas duas indústrias.

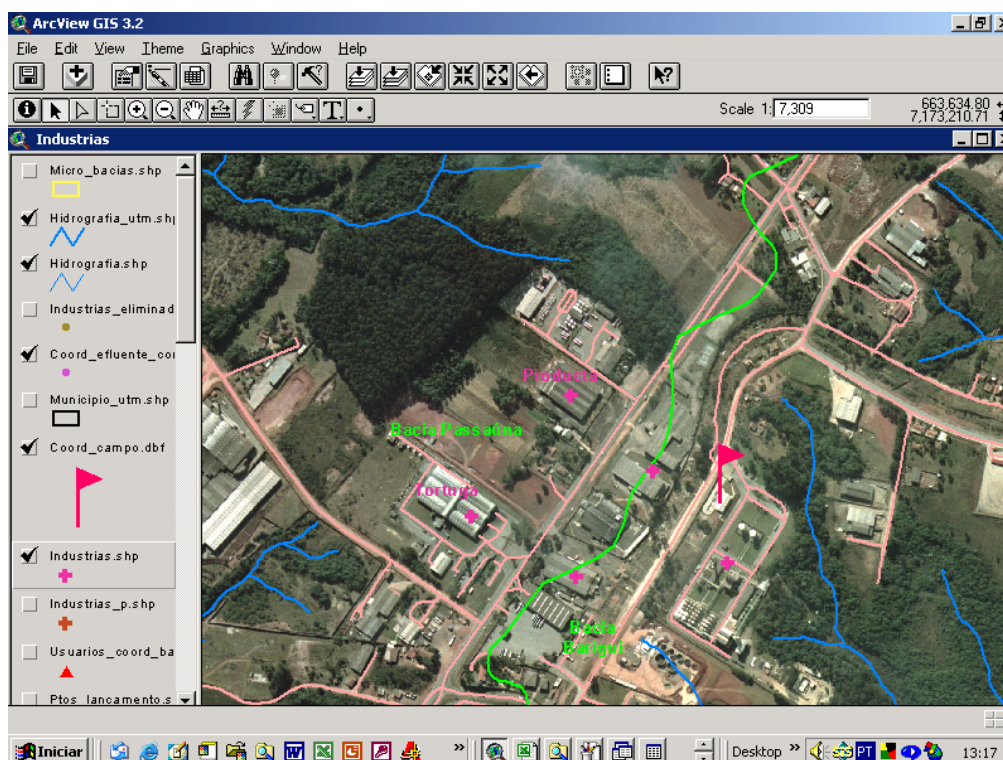
FIGURA 6.5 – LOCALIZAÇÃO DE INDÚSTRIAS PELO ENDEREÇO



Durante esse processo, identificaram-se algumas indústrias, em geral próximas ao limite da bacia, que estariam situadas na bacia do Barigüi, segundo o Cadastro de Usuários, mas que na realidade estão localizadas em outras bacias. Este tipo de erro normalmente ocorre devido à precisão da base cartográfica. Neste caso os dados levantados pelo Cadastro de Usuários tiveram como base a escala 1:50.000 e a base utilizada neste trabalho está na escala 1:10.000. É importante a localização correta de todas as cargas poluidoras pontuais, pois a partir dessas informações são realizadas as simulações de qualidade da água. Quanto mais precisa for a base de dados utilizada, melhor será o resultado das simulações. As indústrias identificadas como localizadas fora do limite da bacia, foram as seguintes: Spaipa, Colle – Bacia do Atuba; Labra, Producta, Tortuga – Bacia do Passaúna; Brasrico, O estado do Paraná – Bacia do Belém; Metalúrgica Angelin, Pepsico, Metalplex – Bacia do Iguaçu.

O exemplo, apresentado na Figura 6.6, mostra as indústrias Tortuga e Producta, que constavam localizadas na bacia do Barigüi, mas na realidade estão na bacia do Passaúna.

FIGURA 6.6 – IDENTIFICAÇÃO DE INDÚSTRIA LOCALIZADA FORA DA BACIA DO BARIGÜI



Essa informação foi confirmada através da realização de uma visita a campo. Durante essa visita identificou-se também que a White Martins mudou de endereço em 2003, estando agora localizada na área de contribuição direta do Iguaçu.

Foram localizadas, desta forma, as 100 indústrias levantadas pelo Cadastro de Usuários. As indústrias provenientes do Cadastro de Usuários não dispunham de informação de data de início de atividade, sendo essas informações obtidas a partir do cadastro de indústrias do IAP (cadastro alfanumérico).

Para o cálculo das cargas e concentração dos poluentes lançadas pelas indústrias, foram utilizadas as informações do Cadastro de Usuários. Os constituintes levantados por este cadastro para as indústrias foram DBO, DQO e Sólidos Suspensos. Novamente só estavam cadastradas no SIG-SUDERHSA as informações das indústrias que tiveram amostras coletadas e analisadas durante o desenvolvimento do Cadastro de Usuários. As informações que foram estimadas para as outras indústrias por ramo de atividade foram provenientes do relatório do Cadastro de Usuários, disponível em meio digital, através de arquivos HTML. Essas informações foram redigitadas no banco de dados. Nesta fase foram selecionadas somente as indústrias que lançam seus efluentes diretamente nos rios e galerias pluviais, não sendo consideradas aquelas que lançam em fossas sépticas ou na rede pública de coleta de esgotos.

Foram consideradas também as indústrias que captam água superficial cadastradas no SIG-SUDERHSA através do bando de dados de outorga. Todas as informações neste caso foram provenientes do SIG-SUDERHSA.

6.2.4 Estações de Tratamento de Esgoto

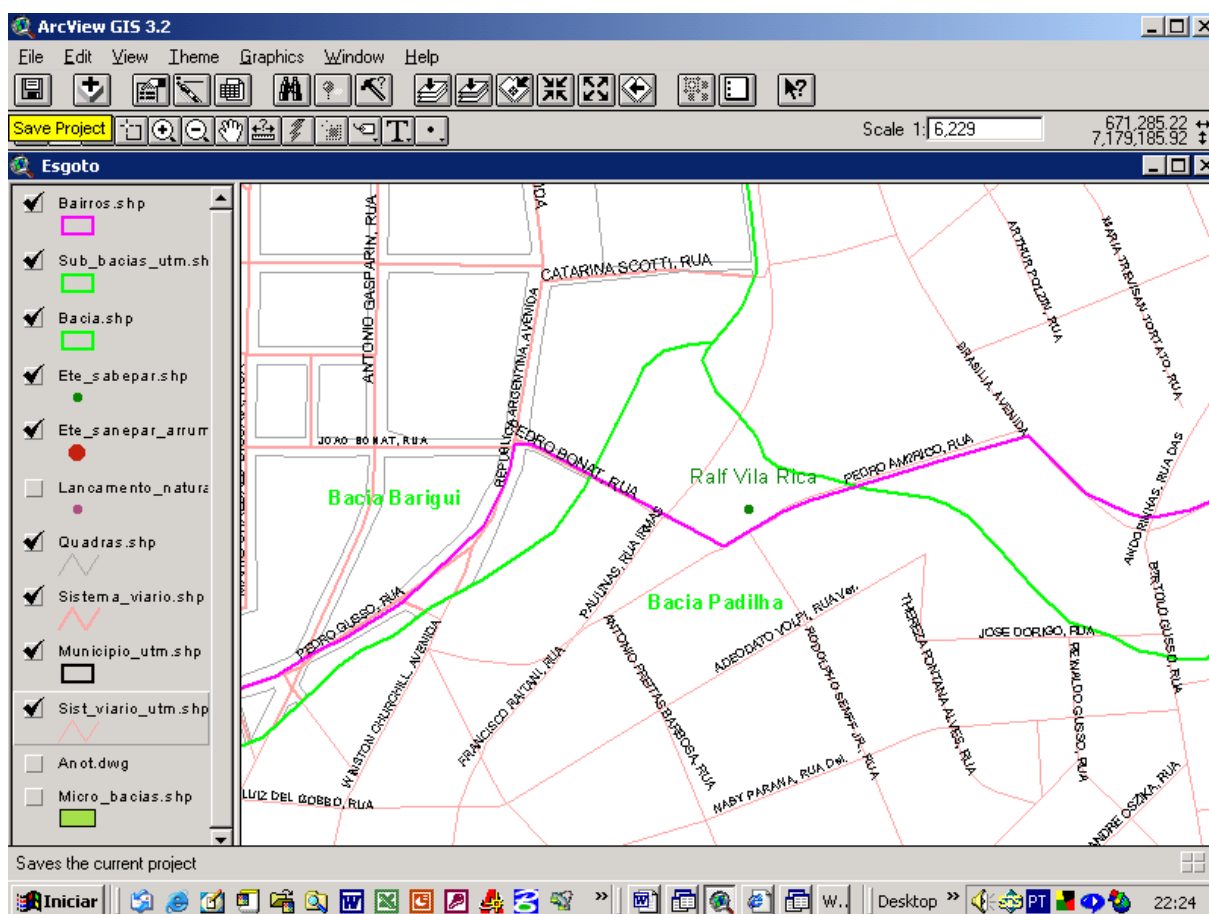
Para as estações de tratamento de esgoto existentes, ativas ou não, provenientes do Cadastro de Usuários. Estavam disponíveis as informações de localização, tipo e modelo da estação (RALF, ETE), data de início e fim de operação,

volume (coletado e tratado) e população atendida para diferentes datas, taxa de eficiência do tratamento, além da estimativa dos constituintes presentes no lançamento de cada uma delas, com base nas análises das amostras de água.

As informações sobre as estações de tratamento de esgoto previstas para serem implantadas pela SANEPAR a partir de 2005, foram provenientes do Projeto Barigüi, e incluíam basicamente as mesmas informações do Cadastro de Usuários, com previsão de capacidade de operação para 2005, 2010, 2015 e 2020.

De forma análoga ao processo realizado para as indústrias, foi feito o ajuste da localização das estações na base cartográfica, utilizando-se o endereço como referência. Durante este processo foi identificado que o RALF Vila Rica estava fora da área da bacia, estando localizado na Bacia do Padilha (Figura 6.7).

FIGURA 6.7 – LOCALIZAÇÃO DO RALF VILA RICA



6.2.5 Estabelecimentos Comerciais e Prestadores de Serviços

Os estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços, considerados neste trabalho, foram provenientes do levantamento realizado pelo Cadastro de Usuários. Na metodologia desenvolvida pelo projeto, foram considerados, como sendo de interesse, os seguintes elementos: hospitais com mais de 20 leitos, hotéis e motéis, restaurantes de grande porte, postos de combustível (que realizam lavagem de carros em grande quantidade), supermercados e condomínios. Neste trabalho foram descartados os condomínios, uma vez que a poluição gerada por eles já está contemplada pelas estações de tratamento de esgoto, pontos de lançamento de esgoto *in natura* e poluição difusa da população não atendida por esgotamento sanitário.

No Cadastro de Usuários estavam disponíveis as informações sobre localização, dados cadastrais básicos, vazão de efluentes gerada por cada empreendimento e concentrações de constituintes amostrados e estimados, valores de referência de quantificação dos serviços prestados, como número de leitos em hospitais, número de refeições/dia servidas em restaurantes, número de quartos de hotel, carros lavados/dia em postos de gasolina. Da mesma forma que as indústrias, apenas os estabelecimentos visitados em campo durante o projeto estavam cadastrados no SIG-SUDERHSA.

Os procedimentos para a localização dos estabelecimentos que não dispunham de coordenadas e complementação dos dados cadastrais foi similar aos procedimentos realizados para as indústrias. Para o posicionamento na base cartográfica utilizou-se como referências, o endereço levantado pelo cadastro, a existência de pontos de captação de água (superficial ou subterrânea), e a base cartográfica e ortofotos provenientes do SIG-SUDERHSA. As informações de data de início e fim de atividade não estavam disponíveis. Quando existia alguma referência de data no SIG- SUDERHSA (data de início de captação de água, por exemplo), esta

data foi adotada como data de início das atividades do estabelecimento. Para os que não dispunham de nenhuma data foi realizado contato telefônico para obter a data aproximada de início das atividades.

Similarmente às indústrias foram também cadastrados os estabelecimentos que captam água superficial no rio disponíveis no SIG-SUDERHSA através do banco de dados de outorga.

6.2.6 Aterros Sanitários

O Cadastro de Usuários realizou um levantamento de todos os aterros e lixões que já existiram na bacia. A maioria desses aterros e lixões está desativada e estão disponíveis somente as informações cadastrais. Existem dois aterros em funcionamento, o aterro industrial da CAVO e o aterro de lixo hospitalar da CIC. Somente para o aterro da CAVO estão disponíveis as informações sobre volume e tipo de poluição gerada, portanto apenas este aterro fará parte da matriz de poluição para aplicação do QUAL2E.

Como todos os aterros e lixões possuíam informações cadastrais e de localização no SIG-SUDERHSA optou-se por mantê-los no banco de dados. As cargas poluidoras e respectivas concentrações foram calculadas para cada parâmetro disponível para o aterro da CAVO.

6.2.7 Lançamento de Esgoto Doméstico *In Natura*

O Cadastro de Usuários, identificou em visitas a campo 98 pontos de lançamento de esgoto doméstico *in natura*. Foram realizadas, pelo projeto do cadastro, análises de amostras de constituintes de alguns desses pontos e por extrapolação foi definido o valor médio de cada constituinte para esse tipo de lançamento. O cadastro

definiu também o número de habitantes contribuinte de cada ponto de lançamento com base no número de quadras próximas ao ponto. Essas informações, o endereço e a coordenada de cada ponto, estavam disponíveis no SIG-SUDERHSA.

Foi verificada a correta localização de cada ponto de lançamento tendo por base o endereço e a base cartográfica. Todos os pontos foram ajustados de forma similar ao ajuste realizado para as outras fontes pontuais. As informações de data e início e fim desses lançamentos não estavam disponíveis no cadastro pois segundo o relatório essas informações não foram disponibilizadas pela SANEPAR. Com base no procedimento efetuado para o cálculo da população não atendida por esgotamento sanitário para o ano de 1996, que identificou se o número de habitantes contabilizados para o ponto de lançamento era compatível com a população existente na micro-bacia, adotou-se como data de início do lançamento o ano de 1996. Segundo informações disponíveis no relatório do Projeto Barigüi a SANEPAR informou que todos esses pontos de lançamento de esgoto *in natura* foram eliminados após a ampliação da rede coletora de esgotos. Para fins das simulações realizadas por este trabalho, considerou-se que estes pontos foram eliminados até o fim do ano de 1999.

6.2.8 Cargas Poluidoras Pontuais

As cargas pontuais consideradas no trabalho são provenientes de várias fontes: indústrias, estações de tratamento de esgoto, aterros sanitários, lançamentos de esgoto *in natura*, estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços, e foram calculadas durante o processo de preparo dos dados de cada uma delas já descritos.

Os constituintes considerados para o cálculo das cargas variaram conforme a disponibilidade da informação para cada fonte de poluição: DBO₅, DQO, Nitrogênio Total, Nitrogênio Orgânico, Fósforo Total, Fósforo Orgânico e Sólidos em Suspensão. Foram calculadas no mínimo as cargas e concentrações relativas à DBO₅.

No caso de lançamentos pontuais a carga poluidora é calculada multiplicando-se a vazão do efluente lançado pela taxa média de cada constituinte. Os valores médios de taxa de cada constituinte variam conforme a origem da poluição, e os valores adotados por este trabalho foram provenientes do Cadastro de Usuários.

Estavam disponíveis no SIG-SUDERHSA a coordenada do ponto do lançamento de efluentes de somente alguns estabelecimentos, e mesmo assim estes pontos apresentavam deslocamento em relação à base cartográfica. Para dar uniformidade a todo o trabalho adotou-se que o ponto de lançamento é o mesmo ponto de localização do estabelecimento, visto que foi realizado um ajuste no ponto de localização de todas as fontes.

6.2.9 População

Os dados de população para o ano 2000, 2005, 2010, 2015 e 2020, foram estimados durante a vigência do Projeto Barigüi por micro-bacia. As informações são relativas a população total, a população atendida por esgotamento sanitário (ou com previsão de atendimento a partir da instalação das novas estações de tratamento de esgoto) e a população não atendida pelo sistema. Essas informações foram introduzidas no banco de dados por micro-bacias.

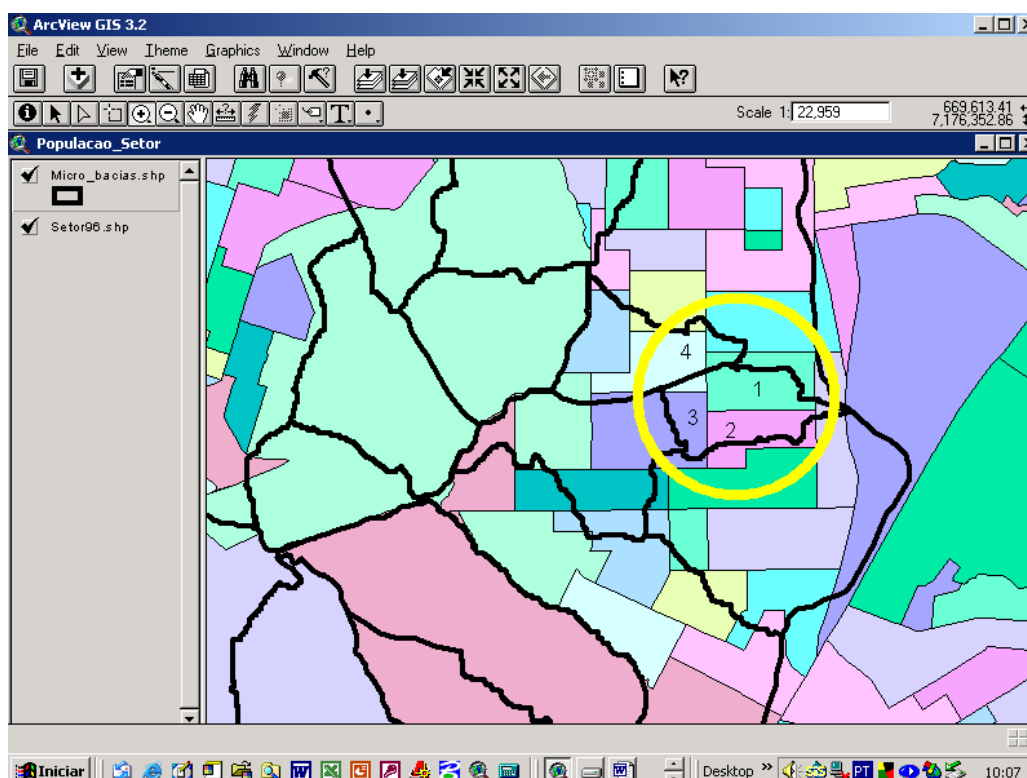
Com o objetivo de representar realidades alternativas, foi calculada a população que não será atendida por esgotamento sanitário caso as obras previstas pela SANEPAR não sejam realizadas, para o ano de 2010. Para este cálculo considerou-se que a população atendida seria a mesma atendida na situação atual.

No intuito de realizar a simulação de eventos passados, foi calculada a população total existente em cada micro-bacia para o ano de 1996, a partir dos valores dos setores censitários do IBGE. Também foi calculada a população não atendida por sistema de esgotamento sanitário para cada micro-bacia para 1996. Para este cálculo

utilizou-se a localização e os dados de população atendida pelas estações de tratamento de esgoto, e a localização e população correspondente aos pontos de lançamento de esgoto *in natura*. O cálculo da população não atendida tem por objetivo a quantificação das cargas difusas geradas pelo lançamento de esgoto não tratado cujos pontos não são conhecidos.

O cálculo da população foi feito pela sobreposição das micro-bacias com os setores censitários no ArcView, a partir de uma análise visual do percentual de cada setor censitário abrangido pela micro-bacia (ou vice-versa). Adotou-se como critério $1/3$ e $2/3$, ou seja, se a área do setor censitário compreendida pela micro-bacia corresponde a mais de $1/3$ da área total do setor censitário, a população daquele setor é somada para a micro-bacia. A Figura 6.8 apresenta os setores censitários, representados pelas áreas coloridas, e a delimitação das micro-bacias, representada pelas linhas pretas. No exemplo desta figura, a micro-bacia BAFB01, em destaque pelo círculo amarelo, abrange 4 setores censitários, sendo que os setores 1 e 2 possuem mais de $1/3$ de sua área dentro da micro-bacia e os setores 3 e 4 não possuem. Desta forma a população total da micro-bacia é a soma da população dos setores 1 e 2.

FIGURA 6.8 – SOBREPOSIÇÃO DE TEMAS NO ARCVIEW PARA O CÁLCULO DA POPULAÇÃO POR MICRO-BACIAS A PARTIR DOS SETORES CENSITÁRIOS

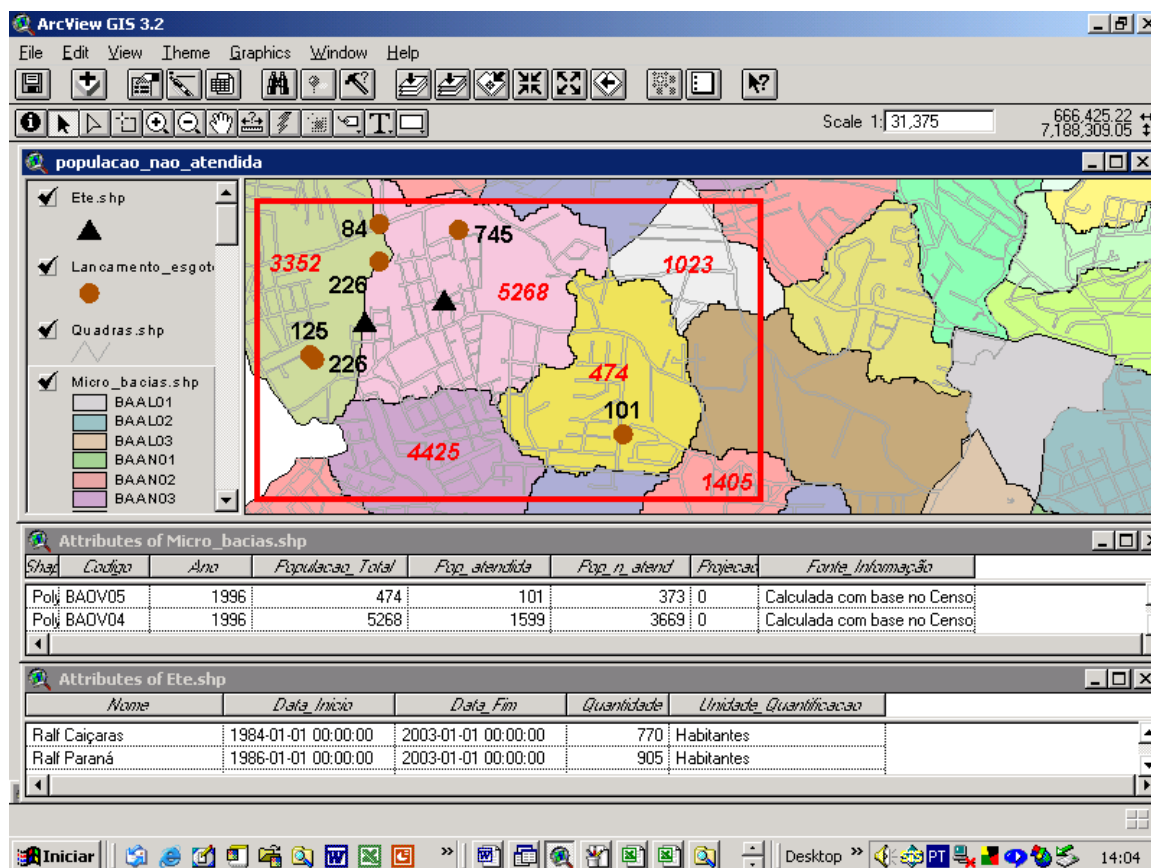


Para calcular a população não atendida por esgotamento sanitário em 1996, utilizou-se os dados das estações de tratamento de esgoto e de lançamento de esgoto *in natura*, levantadas pelo Cadastro de Usuários. As informações disponíveis para as ETEs incluem além da localização, a data de início e fim de operação, e a capacidade de atendimento da estação, em número de habitantes. Para o lançamento de esgoto *in natura*, está disponível a localização e a população (número de habitantes) que contribui para aquele lançamento. Sendo assim, os temas micro-bacia, ETEs e pontos de lançamento de esgoto *in natura*, foram sobrepostos no ArcView, e a população não atendida foi calculada para cada micro-bacia, subtraindo-se da população total, a população atendida pelas ETEs e a população contribuinte para cada ponto de lançamento de esgoto *in natura*, existentes nas proximidades da micro-bacia.

A Figura 6.9 exemplifica o processo realizado. No mapa desta figura a população total existente em cada micro-bacia em 1996, está representada pelos números em vermelho, os lançamentos de esgoto *in natura* estão representados pelos círculos marrons, a população contribuinte para cada ponto de lançamento pelos números em preto e as ETEs estão representadas pelos triângulos pretos. As tabelas existentes na parte inferior da figura apresentam respectivamente os dados de população calculados para cada micro-bacia (*Attributes of Micro_bacia.shp*) e os dados das estações de tratamento de esgoto naquela área (*Attributes of ETE.shp*). A micro-bacia BAOV05 (em amarelo, dentro do retângulo vermelho) tinha população total de 474 habitantes em 1996. O lançamento de esgoto *in natura* situado nesta micro-bacia era relativo a 101 habitantes. A partir da verificação dos outros lançamentos de esgoto *in natura* nas proximidades da micro-bacia, cuja soma era de 1.407 habitantes, a população atendida pelas ETEs próximas, RALF Caiçaras e RALF Paraná, num total de 1.675 habitantes, e a população total das micro-bacias vizinhas, de 15.473 habitantes, considerou-se que a população que não era relativa ao lançamento de esgoto *in natura* naquela micro-bacia, também não contribuía para os demais pontos de lançamentos nas micro-bacias vizinhas, nem era atendida pelos

RALFs próximos. Portanto calculou-se a população não atendida nesta micro-bacia, como sendo a população total menos a população relativa ao lançamento de esgoto in natura situado na micro-bacia ($474 - 101$ habitantes = 373 habitantes).

FIGURA 6.9 – SOBREPOSIÇÃO DE TEMAS NO ARCVIEW PARA O CÁLCULO DA POPULAÇÃO NÃO ATENDIDA POR ESGOTAMENTO SANITÁRIO POR MICRO-BACIA



6.2.9.1 Cargas Poluidoras Difusas

Os constituintes considerados para o cálculo das cargas oriundas de poluição doméstica, considerados pelo projeto Barigüi, foram os seguintes: DBO₅, Coliformes Fecais, Nitrogênio Total, Nitrogênio Orgânico, Fósforo Total, Fósforo Orgânico e Sólidos em Suspensão. A carga poluidora é calculada multiplicando-se o número de habitantes sem atendimento pela taxa média de cada constituinte. A concentração de um constituinte é a carga dividida pela vazão do efluente.

No projeto Barigüi adotou-se as seguintes taxas médias dos constituintes acima listados:

- Taxa de DBO₅: 54 g/hab.dia;
- Taxa de Nitrogênio Total: 9,8 g/hab.dia;
- Taxa de Fósforo Total: 2,7 g/hab.dia;
- Taxa de Coliformes Fecais: 4×10^{11} NMP/hab.dia;
- Taxa de Sólidos em Suspensão: 54 g/hab.dia;
- Taxa de Fósforo Orgânico: 1,36 g/hab.dia;
- Taxa de Nitrogênio Orgânico: 9,07 g/hab.dia.

Foi efetuado o cálculo da carga e concentração apenas do constituinte DBO₅ para todas as datas e trechos. As cargas difusas provenientes do escoamento superficial não foram implementadas no banco devido à falta de dados.

6.2.10 Captações de Água

Embora o volume de água captada no rio Barigüi e seus afluentes não seja significativa, foram levantadas as captações de água outorgadas existentes no SIG-SUDERHSA com o objetivo de demonstrar a capacidade do modelo em tratar as retiradas de água dos rios. As informações referentes às captações foram levantadas durante o processo de preparo dos dados das indústrias e estabelecimentos comerciais já descritos.

Para geração da matriz de poluição para aplicação no QUAL2E é necessário informar a localização de descargas de efluentes ou retiradas de água no rio através dos elementos computacionais, cada descarga ou retirada corresponde a um elemento computacional. Cada elemento computacional está relacionado a uma ou mais micro-bacias, portanto é necessário que cada descarga ou retirada tenha a informação de qual micro-bacia pertence. Após a correta localização de todas as fontes de poluição

pontual e captações de água, foi derivada a informação da micro-bacia utilizando-se a função “*assign data by location – spatial join – inside*” do ArcView.

6.3. IMPLEMENTAÇÃO NO ARCVIEW





Foram criadas uma série de vistas no ArcView, uma para cada simulação, algumas visões para comparação entre os resultados de duas simulações, e uma vista geral com todos os dados disponíveis no banco de dados. Em cada vista foram carregados os dados relativos à simulação, evento, trecho do rio (c/ informação da qualidade e vazões), e os dados relativos à população através das micro-bacias. Foram carregadas também todas as fontes pontuais, classificadas em indústria, comércio e serviço, aterros sanitários, lançamento de esgoto *in natura*, estações de tratamento de esgoto, e respectivas cargas, e captações, de acordo com a legenda apresentada a seguir:

✚ Captações de água superficial

Fontes Poluidoras Pontuais:

- Aterros Sanitários
- Comércios Serviços
- Esgoto In Natura
- ETEs
- Indústrias

As micro-bacias foram apresentadas em função da população não atendida por saneamento básico, em número de habitantes, conforme classificação a seguir:

	< 1.000
	1.001 a 5.000
	5.001 a 10.000
	> 10.000

Segundo a Portaria SUREHMA nº 020 de 12 de maio de 1992, que enquadra os cursos d'água da Bacia do Rio Iguaçu, classificando-os de acordo com a Resolução CONAMA nº 20/86, o rio Barigüi e seus afluentes pertencem à *classe 2*, com exceção do trecho a jusante do parque Barigüi que pertence à *classe 3*. Em função disso, a informação sobre a qualidade é apresentada pelo trecho do rio classificado pelo limite de concentração do parâmetro DBO₅ determinado pela resolução CONAMA 20/86 para as classes 1, 2, 3 e 4 conforme apresentado a seguir:

Cor	Concentração de DBO ₅	Classe
	< 3	1
	3 –5	2
	5- 10	3
	> 10	4

7. RESULTADOS

Segundo os requisitos definidos para este trabalho, o modelo proposto deveria possibilitar a realização das seguintes funções, no contexto de uma aplicação espaço-temporal para análise da variação da qualidade da água em uma bacia hidrográfica: atualização, inventário, análise e apresentação.

A atualização de dados em uma aplicação espaço-temporal deve ser feita inserindo-se os novos dados sem eliminar os dados antigos (LANGRAN, 1992). Com a estrutura proposta por este modelo, todas as informações são inseridas no banco de dados sem substituir as antigas, conforme exemplificado na Figura 7.1. Neste exemplo a estação de tratamento de esgoto Santa Quitéria, apresenta diferentes situações com relação ao número de habitantes atendidos e a vazão de efluentes gerada, no passado, presente e futuro. As novas informações não substituem as antigas, dessa forma é possível acompanhar a evolução da entidade ao longo do tempo.

FIGURA 7.1 – EXEMPLO DA FUNÇÃO DE ATUALIZAÇÃO NO MODELO PROPOSTO

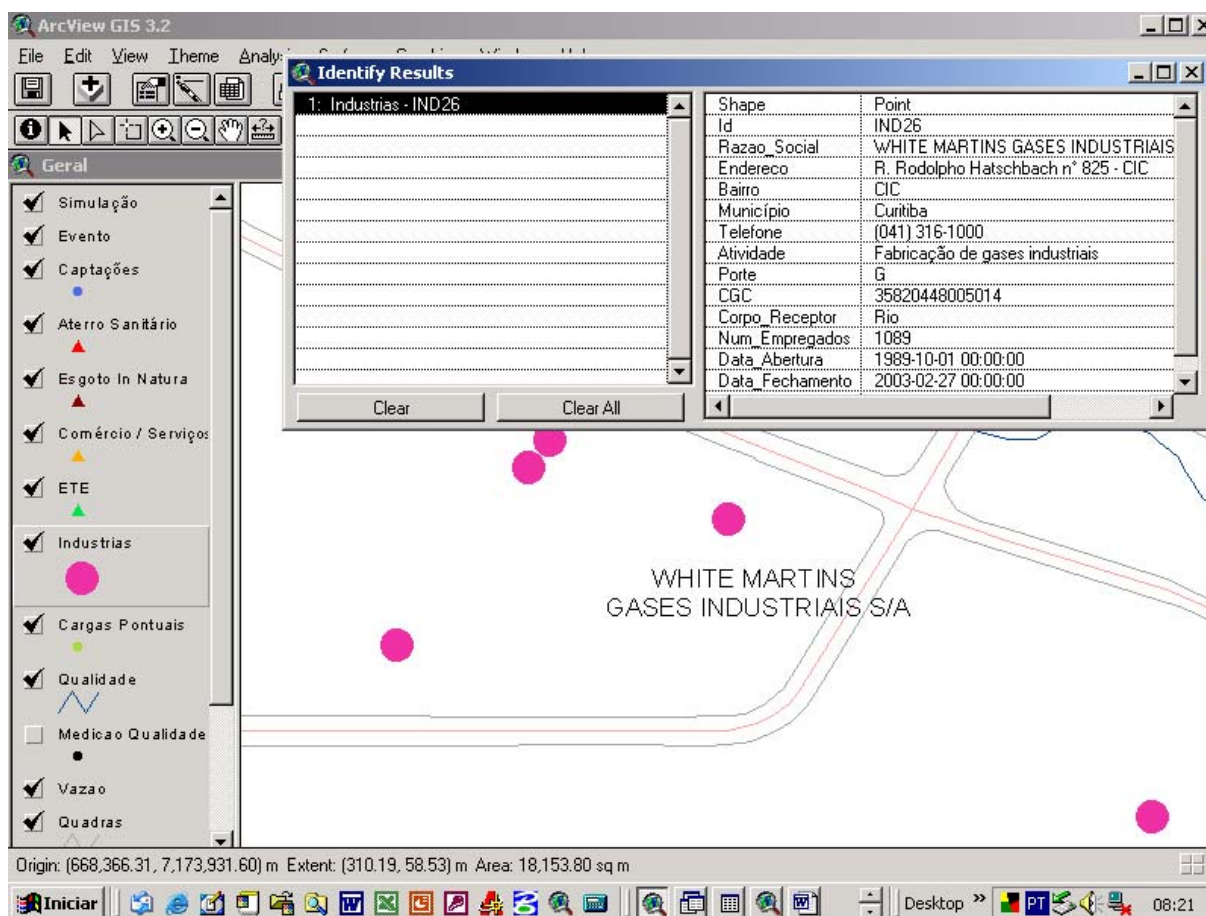
Codigo	Nome	Endereco	Bairro	Tipo	Modelo
ETE1	ETE Santa Quitéria	R. João Alencar Guimarães s/n	Santa Quitéria	RALF (8 unidades)	Quadrado

	Descricao	Tipo_Efluente	Vazao	Quantidade	Unidade_C	Data_Inicio	Data_Fim	Projec
+	Efluente ETE Santa Quitéria	Esgoto Doméstico	119,4	198000	Habitantes	01-jan-98	01-jan-03	<input type="checkbox"/>
+	Efluente ETE Santa Quitéria	Esgoto Doméstico	299,6	198000	Habitantes	01-jan-03	01-jan-05	<input type="checkbox"/>
+	Efluente ETE Santa Quitéria	Esgoto Doméstico	487,7	196960	Habitantes	01-jan-05	01-jan-10	<input checked="" type="checkbox"/>
+	Efluente ETE Santa Quitéria	Esgoto Doméstico	536,6	222526	Habitantes	01-jan-10	01-jan-15	<input checked="" type="checkbox"/>
+	Efluente ETE Santa Quitéria	Esgoto Doméstico	597,8	255593	Habitantes	01-jan-15	01-jan-20	<input checked="" type="checkbox"/>
+	Efluente ETE Santa Quitéria	Esgoto Doméstico	661,9	283380	Habitantes	01-jan-20		<input checked="" type="checkbox"/>

Registro: 1 de 6

Além disso, as entidades que desaparecem no mundo real, continuam “existindo” no banco de dados. O exemplo apresentado na Figura 7.2 mostra a indústria White Martins, cuja unidade localizada na bacia do Barigüi foi desativada em 2003. As informações referentes a indústria continuam disponíveis para as consultas, como pode ser visualizado no quadro *Identify Results*, na figura.

FIGURA 7.2 – EXEMPLO DE ENTIDADE ELIMINADA

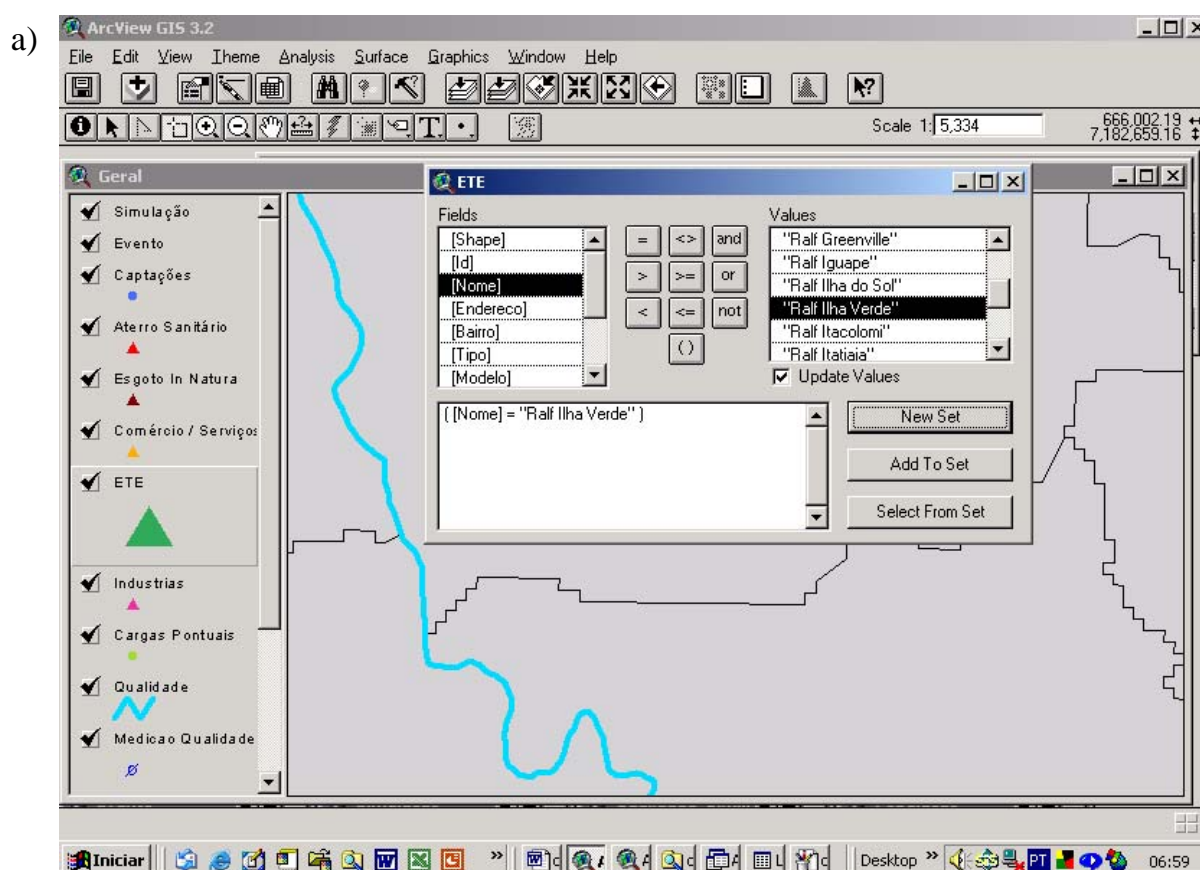


O propósito de um inventário é enumerar e descrever os componentes críticos de uma região. Armazenar a descrição mais completa possível de uma região e das mudanças ocorridas, respondendo questões sobre a evolução de uma entidade, as mudanças ocorridas em uma região ao longo do tempo ou a situação de um local ou entidade em um determinado momento (LANGRAN, 1992).

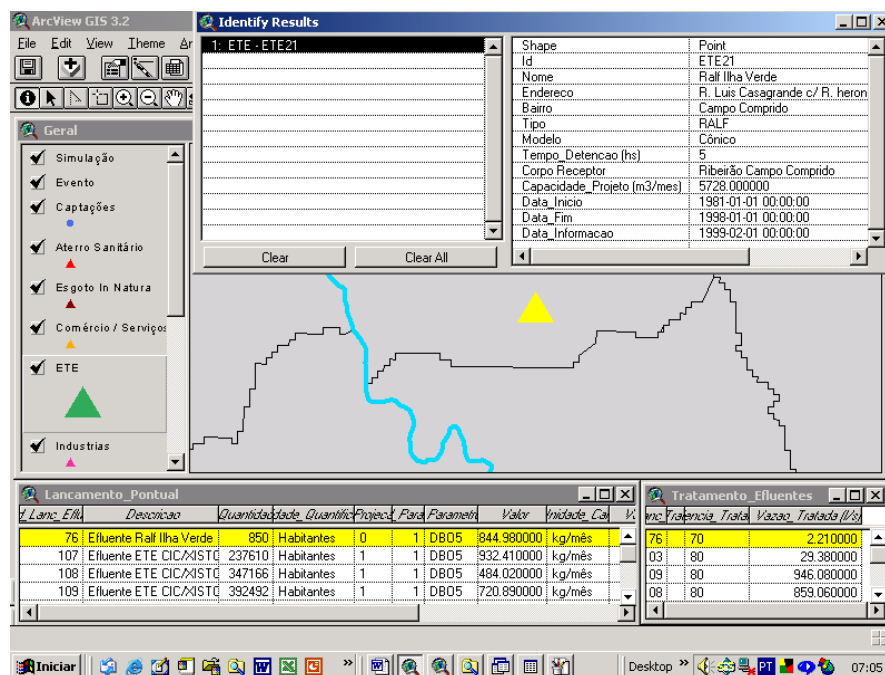
Através do modelo desenvolvido neste trabalho, é possível identificar todos os componentes críticos de uma determinada região, neste caso, a bacia hidrográfica, como será demonstrado nas consultas apresentadas a seguir. Para este trabalho, os componentes críticos são as variáveis relacionadas à qualidade da água, fontes de poluição pontuais e difusas e captações da água.

Na Figura 7.3, é apresentada uma consulta realizada a partir da identidade de um objeto. Conforme demonstrado na Figura 7.3a, foi feita uma consulta acerca da posição da entidade Ralf Ilha Verde. A resposta do sistema (Figura 7.3b) apresenta a localização da entidade, representada no mapa pelo triângulo amarelo, permite determinar qual o período de existência da entidade, neste caso 1981 a 1998, qual a situação atual, neste caso desativada e conhecer as características específicas de um objeto daquele tipo. O Ralf Ilha Verde é uma estação de tratamento de esgoto, e possui informações sobre a capacidade de operação, população atendida, tipo e eficiência de tratamento e sobre a carga de poluição gerada por esta entidade, conforme demonstrado nas tabelas *Lançamento Pontual* e *Tratamento Efluentes* (Figura 7.3b)

FIGURA 7.3 – EXEMPLO DE UMA CONSULTA BASEADA EM ENTIDADE

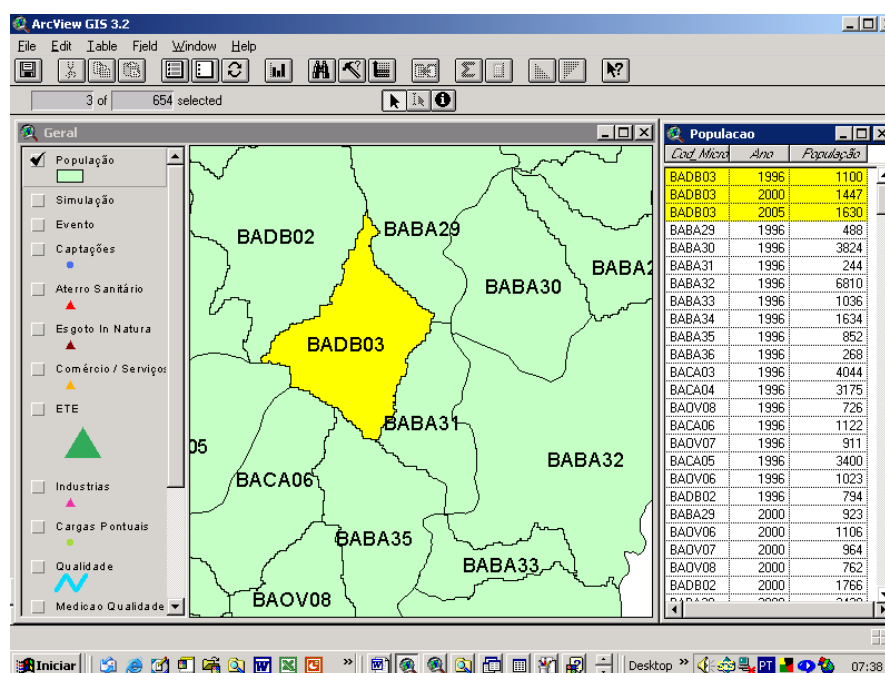


b)



A Figura 7.4 apresenta um exemplo de consulta baseada em uma localização, para demonstrar como uma entidade, no caso população existente em uma micro-bacia, evoluiu ao longo do tempo. A micro-bacia foi selecionada no mapa a partir da sua localização, e o sistema apresentou todos os dados de população existentes para aquela bacia.

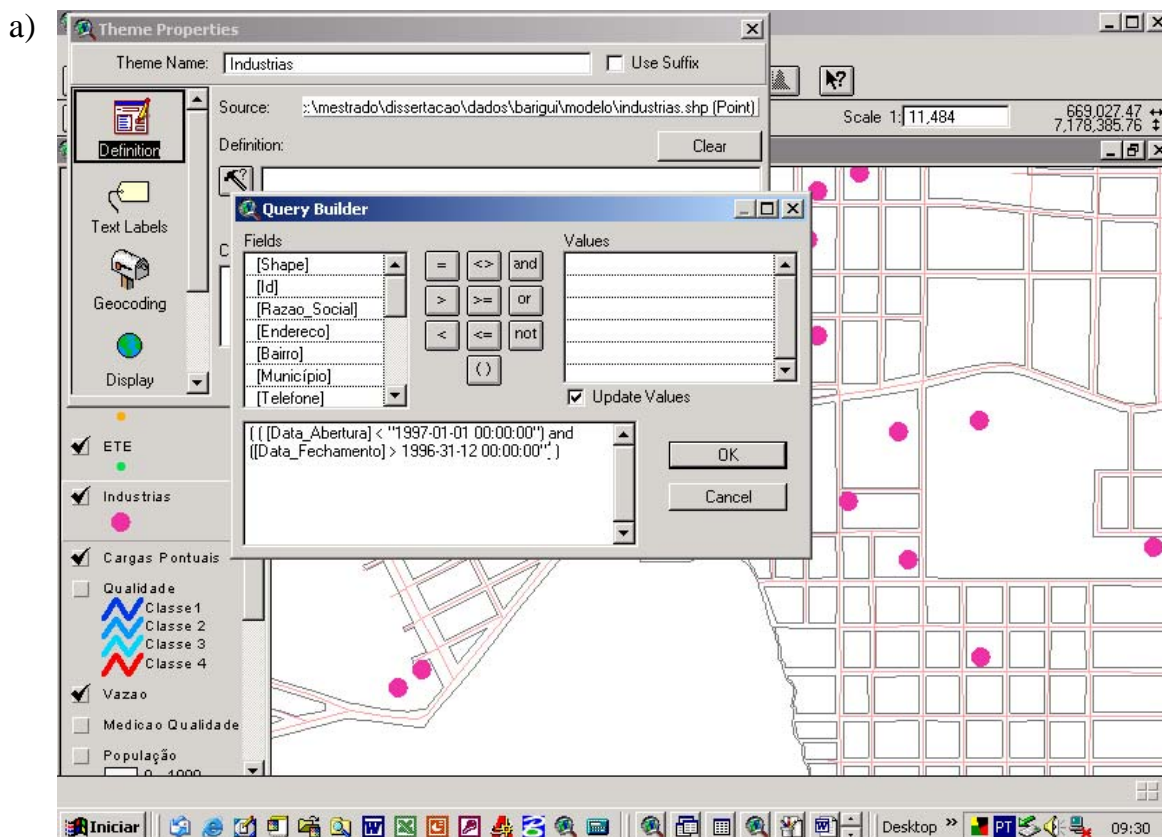
FIGURA 7.4 – EXEMPLO DA EVOLUÇÃO DE UMA ENTIDADE

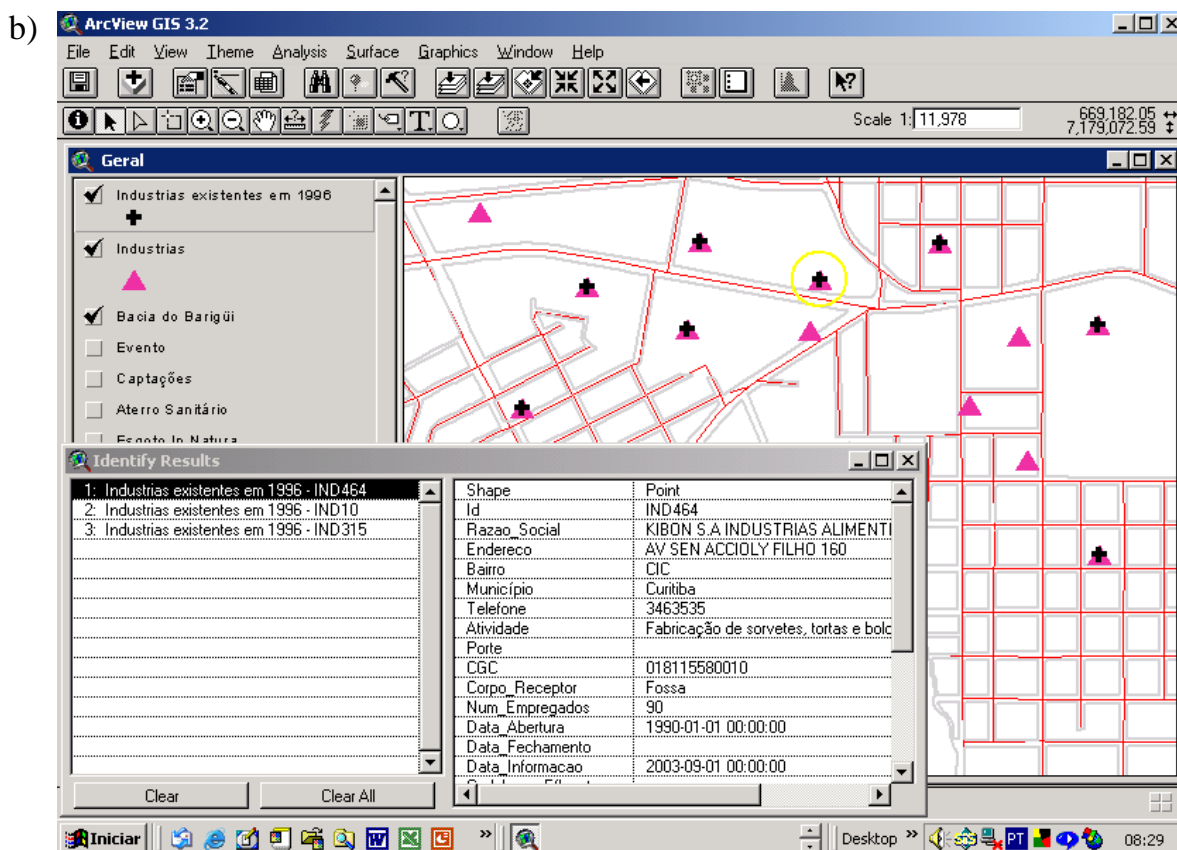


A partir do modelo espaço-temporal proposto também é possível realizar consultas baseadas no tempo, ou seja, determinar em uma data específica qual a situação de uma região ou entidade.

No exemplo a seguir (Figura 7.5a), é apresentada uma consulta para identificar quais as indústrias existentes em 1996. No resultado da consulta (Figura 7.5b) todas as indústrias que existiram em qualquer data na bacia estão representadas pelos triângulos rosas e as indústrias que existiam em 1996 pelos símbolos (+) pretos. Nesta consulta é possível verificar também a situação de uma entidade específica, naquela data. Por exemplo, a indústria Kibon destacada pelo círculo amarelo na Figura 7.5b, existia em 1996 e todas as informações relativas a ela naquela data podem ser consultadas.

FIGURA 7.5 - EXEMPLO DE UMA CONSULTA BASEADA NO TEMPO

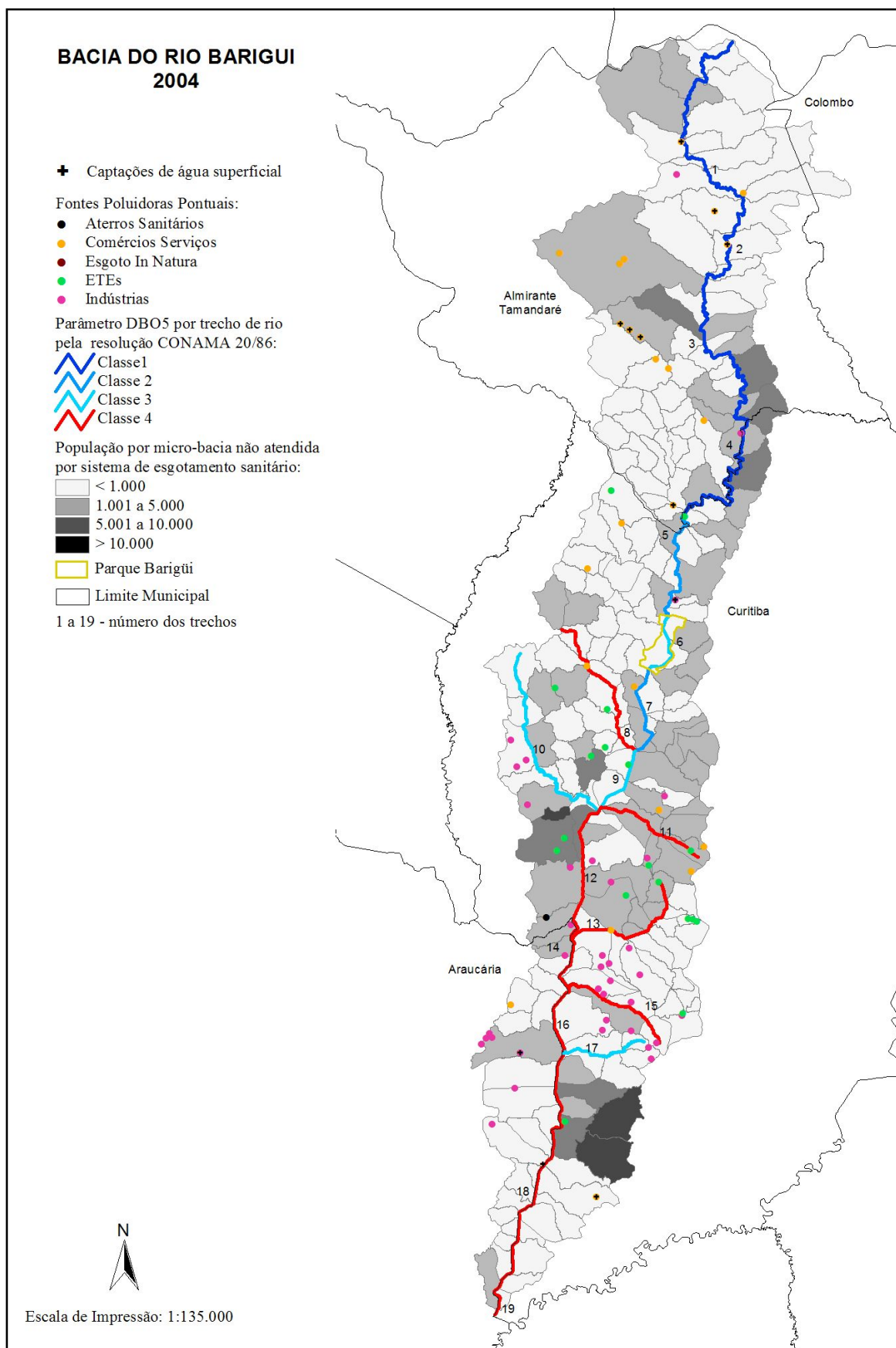




Outro requisito de uma aplicação espaço-temporal em SIG, com relação ao inventário, é descrever com maior grau de detalhamento possível uma região em um determinado momento. No exemplo apresentado na Figura 7.6, são mostrados todos os elementos, relacionados à qualidade da água, fontes pontuais e difusas e captações da água, na bacia do Barigüi, em 2004.

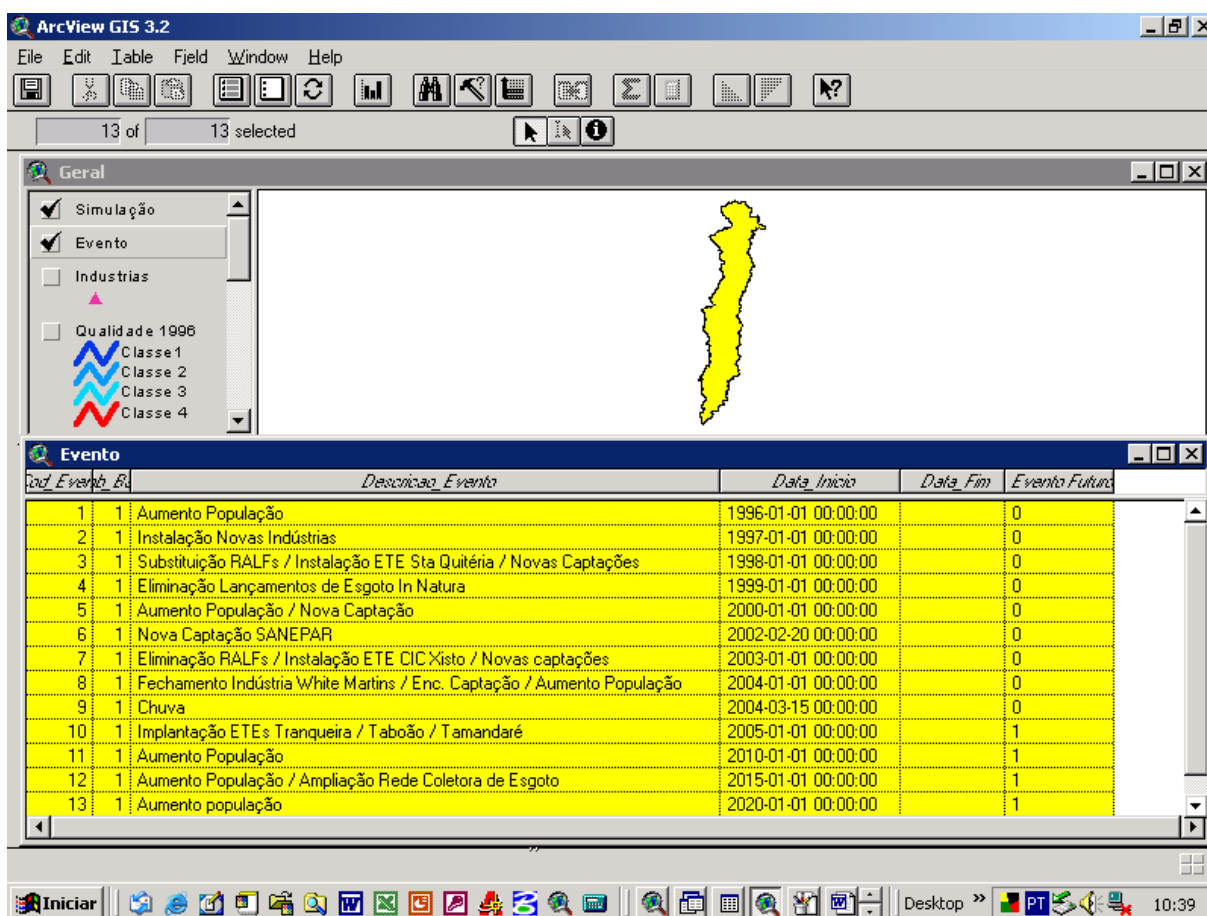
Com o uso do modelo é possível realizar consultas e análises baseadas no evento. A partir da consulta por uma região, no caso a bacia hidrográfica, é possível saber todos os eventos que ocorreram em um intervalo de tempo. A Figura 7.7 mostra uma consulta na bacia do Barigüi, listando todos os eventos que foram cadastrados por este projeto. Por esta lista é possível identificar os acontecimentos que ocorreram ou ocorrerão na bacia em uma data específica, por exemplo, em 1999 houve a eliminação dos pontos de lançamento de esgoto *in natura*.

FIGURA 7.6 SITUAÇÃO EXISTENTE NA BACIA DO RIO BARIGÜI EM 2004



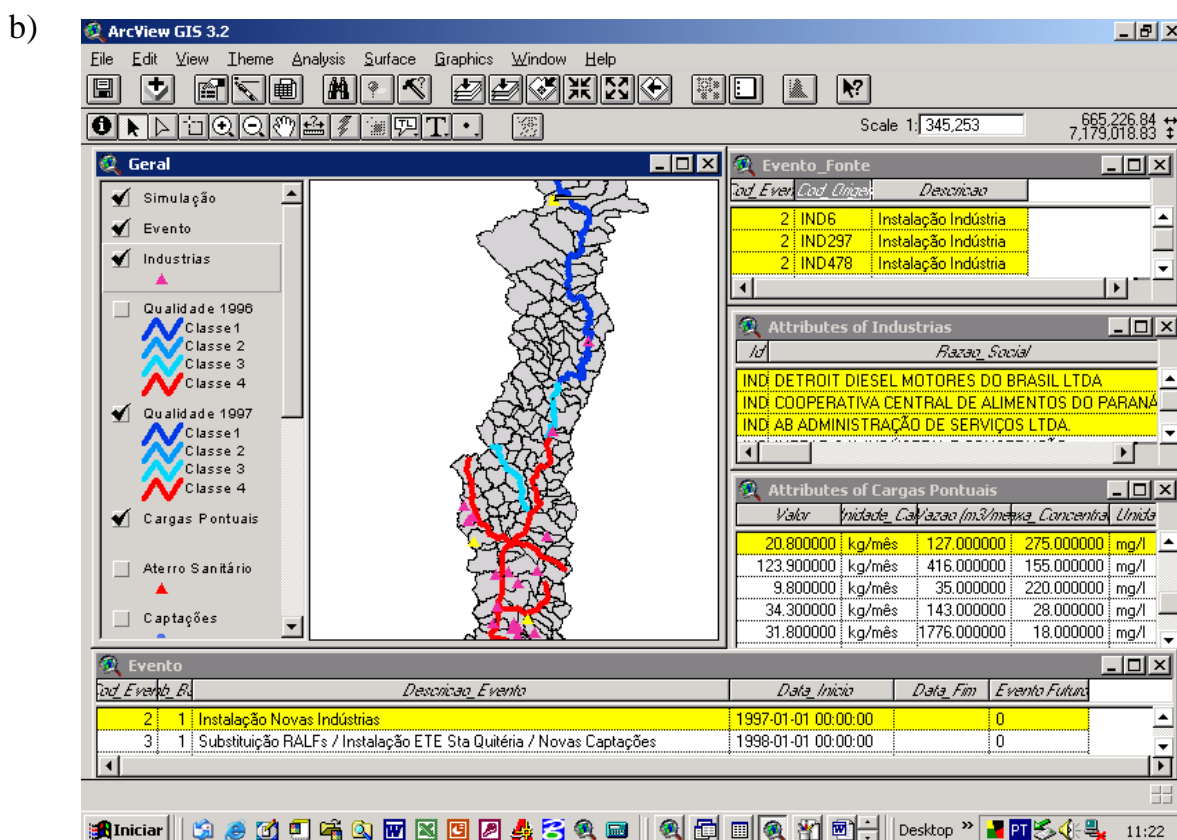
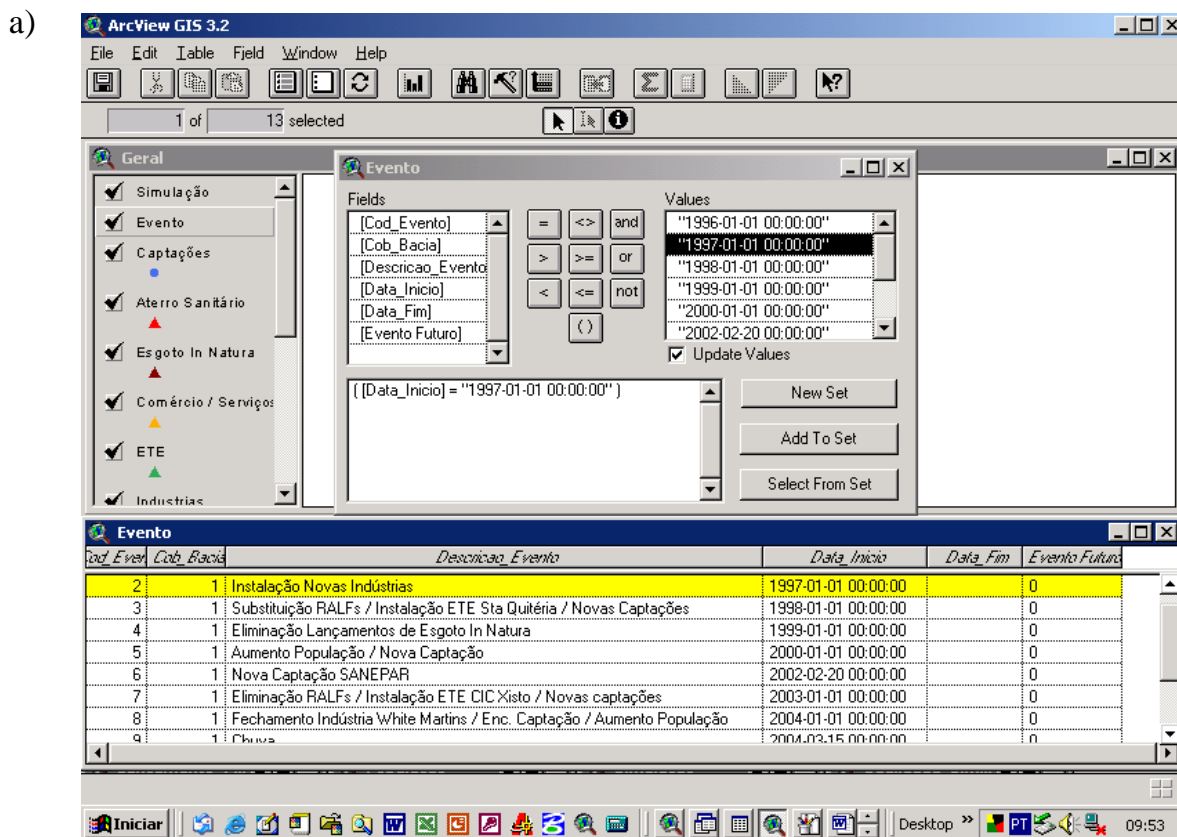
FONTE DOS DADOS: SUDERHSA (1999 / 2004) / IPPUC (2003) / Projeto Barigüi (2004)

FIGURA 7.7 – CONSULTA DE EVENTOS



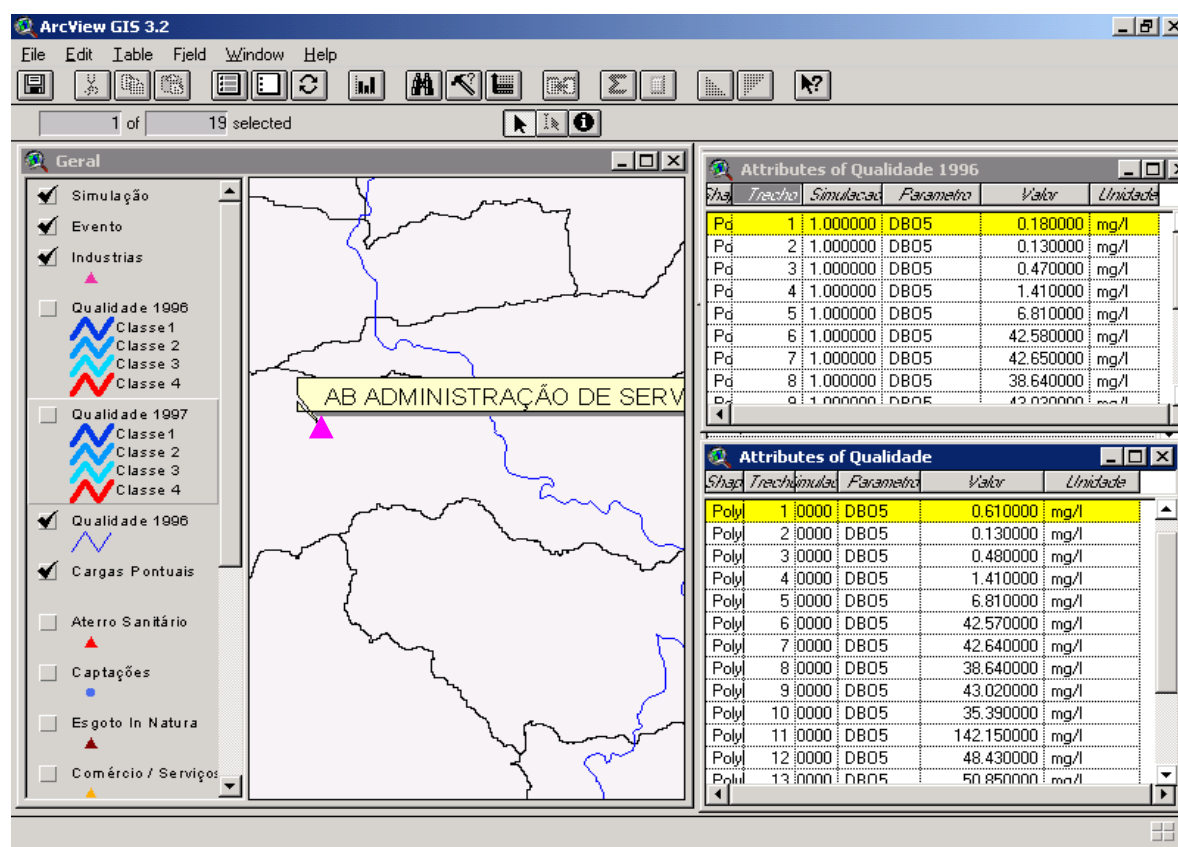
A partir da consulta a um determinado evento é possível saber que mudanças ocorreram na bacia naquela data, e que impactos essa mudança causou. A Figura 7.8 mostra a realização de uma consulta ao evento, com base em uma data, neste caso 1997. O resultado da consulta indicou que nesse ano ocorreram a instalação de 3 novas indústrias, através da notação específica da mudança implementada pelo modelo, a entidade *Evento* na Figura 7.8a. Com base no relacionamento entre o evento e as fontes de poluição, entidade *Evento Fonte*, na Figura 7.8b, identifica-se que as indústrias instaladas em 1997, foram a Detroit Diesel, Cooperativa Central de Alimentos e AB Administradora de Serviços, qual a localização delas (triângulos amarelos) e possibilita a consulta das informações relativas a qualquer uma delas.

FIGURA 7.8 - CONSULTA DO EVENTO OCORRIDO EM UMA DATA ESPECÍFICA



É possível consultar, por exemplo, os valores relativos à carga poluidora gerada pela indústria AB Administração de Serviços, através da entidade *Carga Pontual* (Figura 7.8b). Essa indústria gera uma carga de 20,80 kg/mês de DBO. A partir dos resultados da simulação para aquele evento é possível verificar o impacto causado por aquele empreendimento, neste caso, a concentração de DBO em 1996, data anterior à implantação da indústria era de 0,18 mg/l, e com a instalação da indústria passa a ser de 0,61 mg/l (Figura 7.9). Ou seja, este empreendimento não causou problemas à qualidade da água, neste trecho do rio, nesta data, pois o trecho continua pertencendo à classe 1 da resolução CONAMA 20/86.

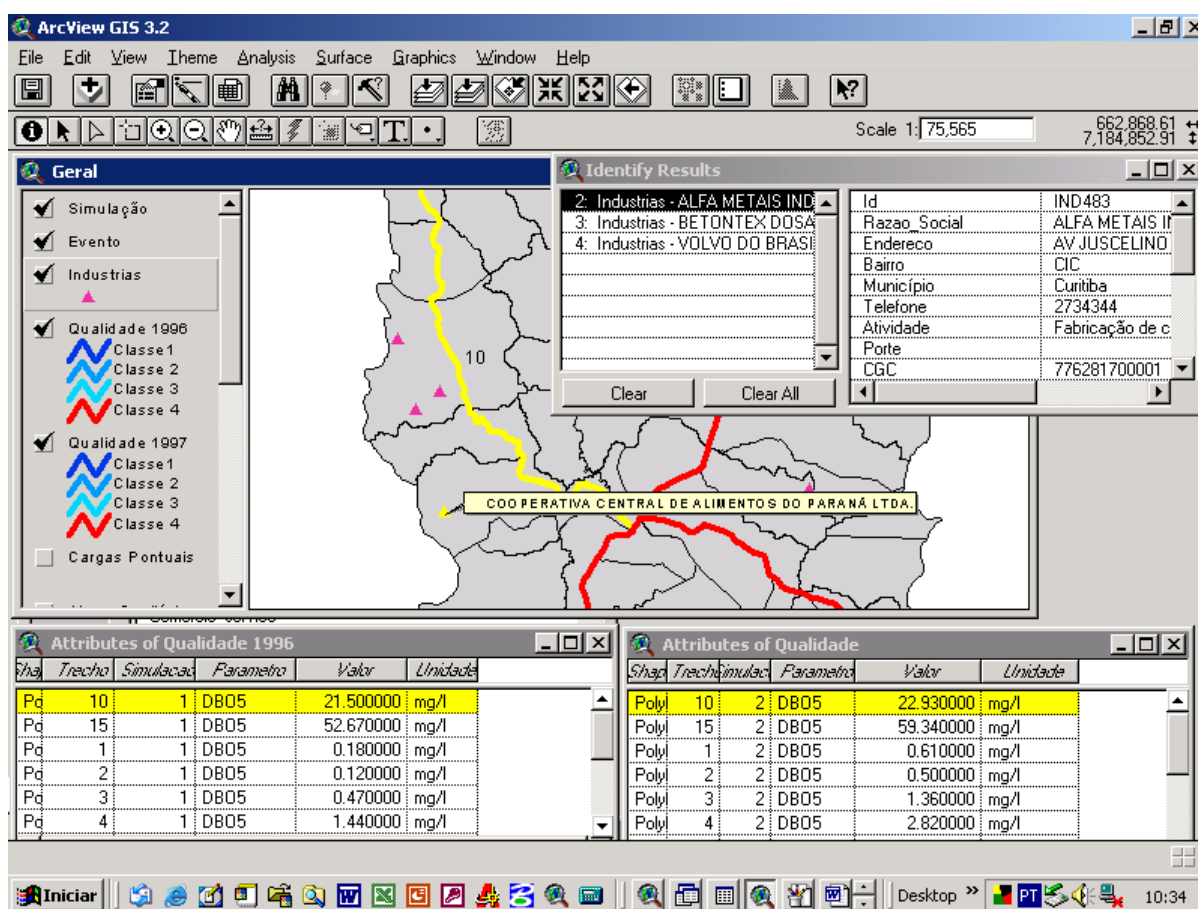
FIGURA 7.9 – AVALIAÇÃO DO IMPACTO CAUSADO POR UMA FONTE POLUIDORA



Devido a uma limitação do QUAL2E para o parâmetro DBO₅ de 1000 mg/l para cada elemento computacional, o resultado das simulações para os trechos de rio com maior número de fontes poluidoras pontuais pode ser prejudicado, como mostra o exemplo na Figura 7.10. Neste exemplo, aparentemente a implantação da indústria

Cooperativa Central de Alimentos não acarretaria em grande impacto na qualidade da água do rio naquele trecho. No entanto este resultado não condiz a realidade, pois foi condicionado pela limitação do QUAL2E, já que estão localizadas na mesma micro-bacia outras indústrias bastante poluidoras como a Alfa Metais, Betontex e Volvo do Brasil, o que faz com que se ultrapasse o limite imposto pelo QUAL2E de 1000 mg/l para a DBO₅.

FIGURA 7.10 – EXEMPLO DE RESULTADO DA SIMULAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA PREJUDICADO PELA LIMITAÇÃO DO MODELO QUAL2E PARA O PARÂMETRO DBO₅

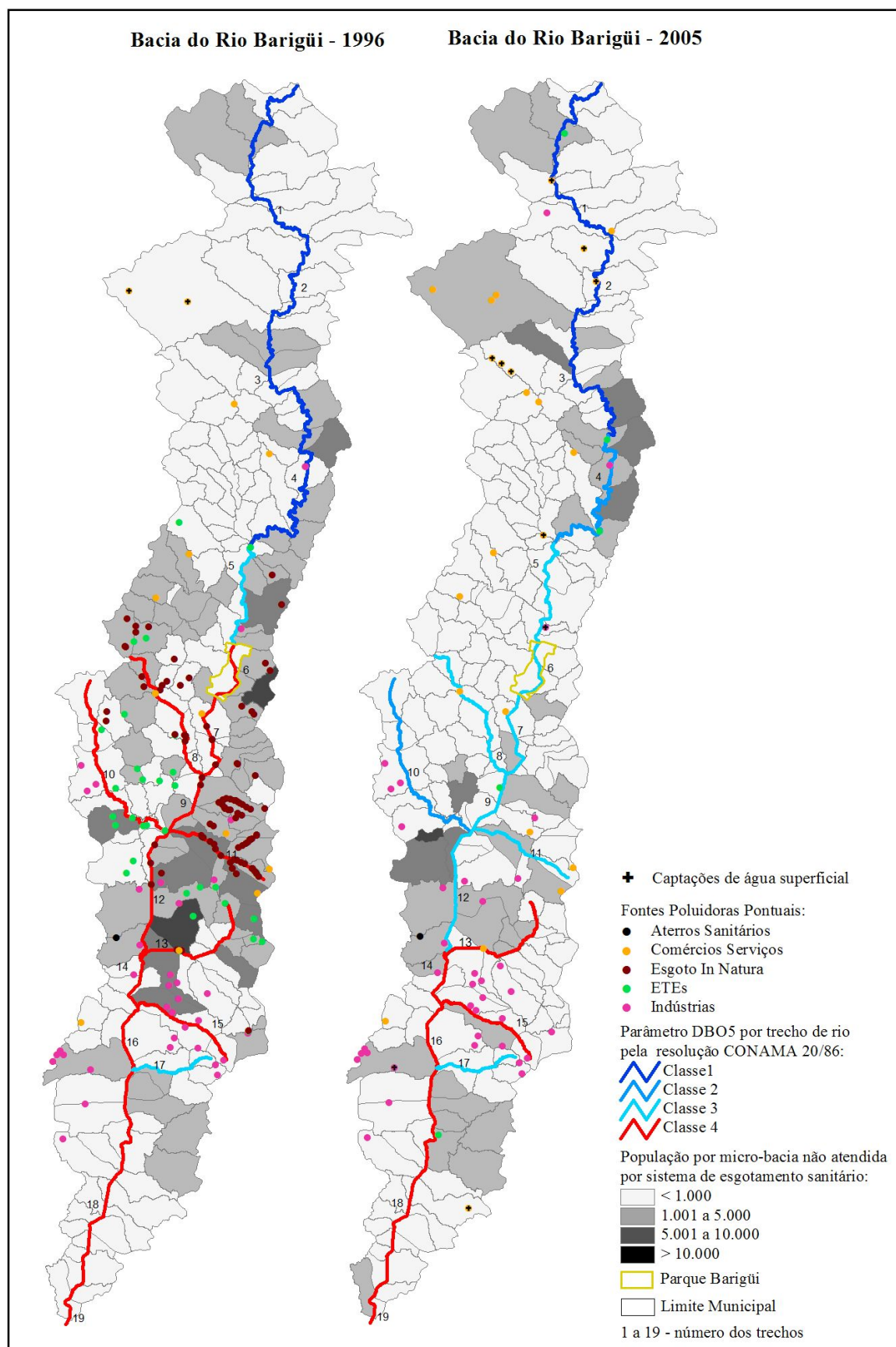


A função primordial da análise em uma aplicação espaço-temporal em SIG é formar uma base para o entendimento das causas das mudanças ocorridas, determinar se existe um padrão temporal e quais os processos que determinaram essas mudanças (LANGRAN, 1992).

A Figura 7.11 mostra a qualidade da água em relação ao parâmetro DBO₅ em 1996 e em 2005. Analisando-se esta figura é possível identificar claramente a influência das fontes de poluição sobre a qualidade da água na bacia do Barigüi. Pode-se identificar, por exemplo, que a eliminação dos pontos de lançamento de esgoto *in natura* e estações de tratamento de esgoto, existentes em 1996, tiveram impacto determinante na qualidade do trecho 10, que passou da classe 4 para a classe 2. Pode-se verificar também que o trecho 4, sofreu a influência da poluição difusa gerada pela população que não é atendida por tratamento de esgoto, passando da classe 1 para a classe 2. Por outro lado, os trechos 5 e 6 tiveram a qualidade melhorada, em relação ao parâmetro DBO₅, justamente pela diminuição da poluição difusa causada por esgoto doméstico, em função da instalação de novas estações de tratamento de esgoto. Fica evidente também que o trecho 12, teve a qualidade melhorada em consequência da desativação dos RALFs. Pela análise dos mapas identifica-se que não houve alteração significativa das indústrias existentes em 1996 e em 2005. pode-se avaliar também que os trechos com grande concentração de indústrias, 15 e 16, não apresentam melhora na qualidade da água em função das obras de saneamento que foram realizadas na bacia. Através dos mapas apresentados é possível ter conhecimento não só das mudanças ocorridas na qualidade da água mas também de quais fatores influenciaram essas mudanças.

Através do SIG é possível consultar exatamente quais foram as alterações ocorridas entre as duas datas, identificando – se quais fontes de poluição pontual foram instaladas ou desativadas neste período, qual a carga gerada por estas fontes, conforme já demonstrado nas Figuras 7.10 e 7.9.

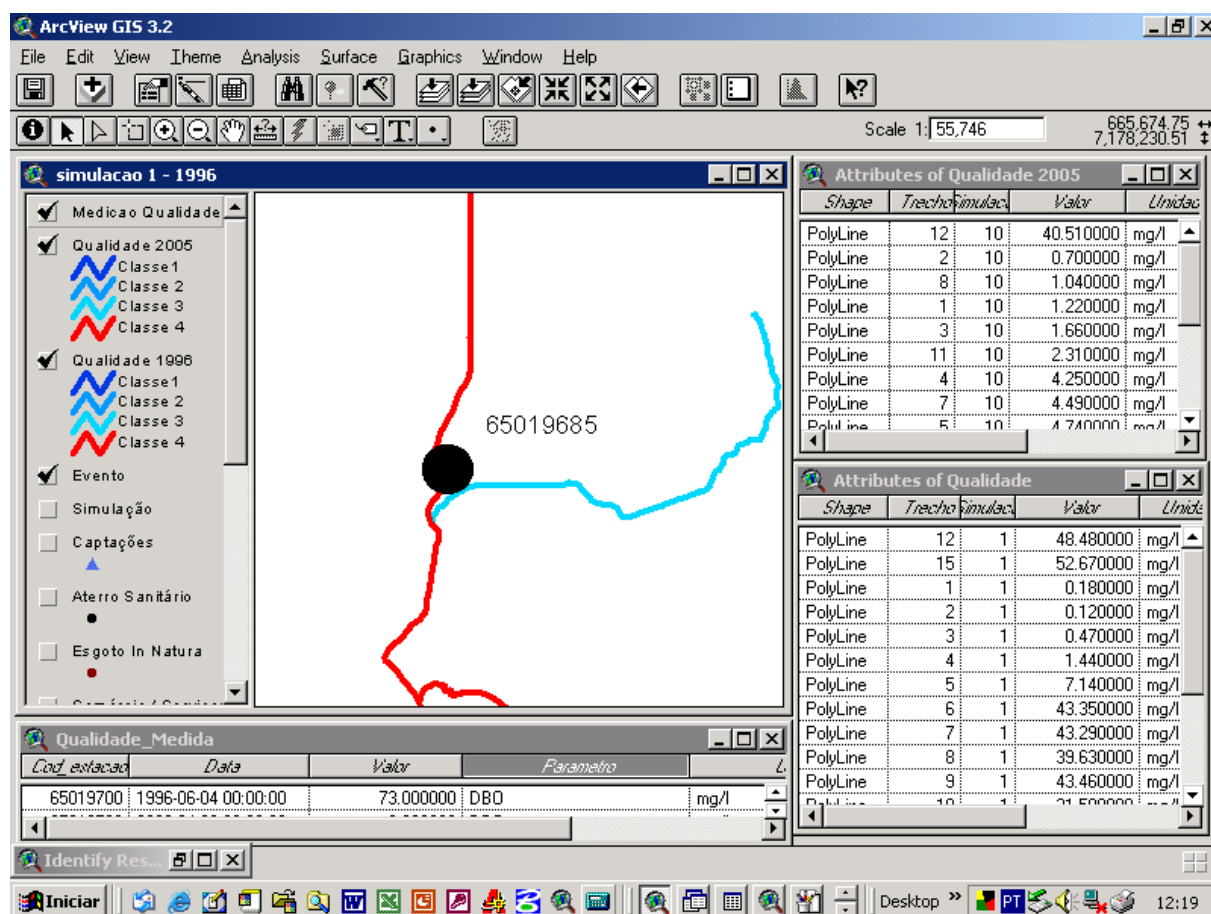
FIGURA 7.11 – COMPARAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA E AGENTES ENVOLVIDOS ENTRE 1996 E 2005



FONTE DOS DADOS: SUDERHSA (1999 / 2004) / IPPUC (2003) / Projeto Barigüi (2004)

É possível verificar também os valores exatos da DBO₅ para um mesmo trecho do rio entre as duas datas, e compará-los a valores de medidas realizadas em campo, conforme apresentado na Figura 7.12. Este exemplo mostra que a concentração de DBO₅ no trecho 12, em 1996 era de 48,49 mg/l e em 2005 será de 40,51 mg/l, ou seja, não houve variação no valor deste parâmetro. Pode-se constatar também que estes valores estão muito acima dos valores determinados pela resolução CONAMA 20/86, para este trecho do Barigüi, que deveria ser um rio de classe 3, e portanto o valor máximo da concentração de DBO₅ permitido é de 10 mg/l. A partir da consulta aos resultados de análises laboratoriais existentes para a estação 65019685, nota-se que os valores medidos em campo apresentam concentrações ainda mais elevadas, como o valor de 73 mg/l, medido em junho de 1996.

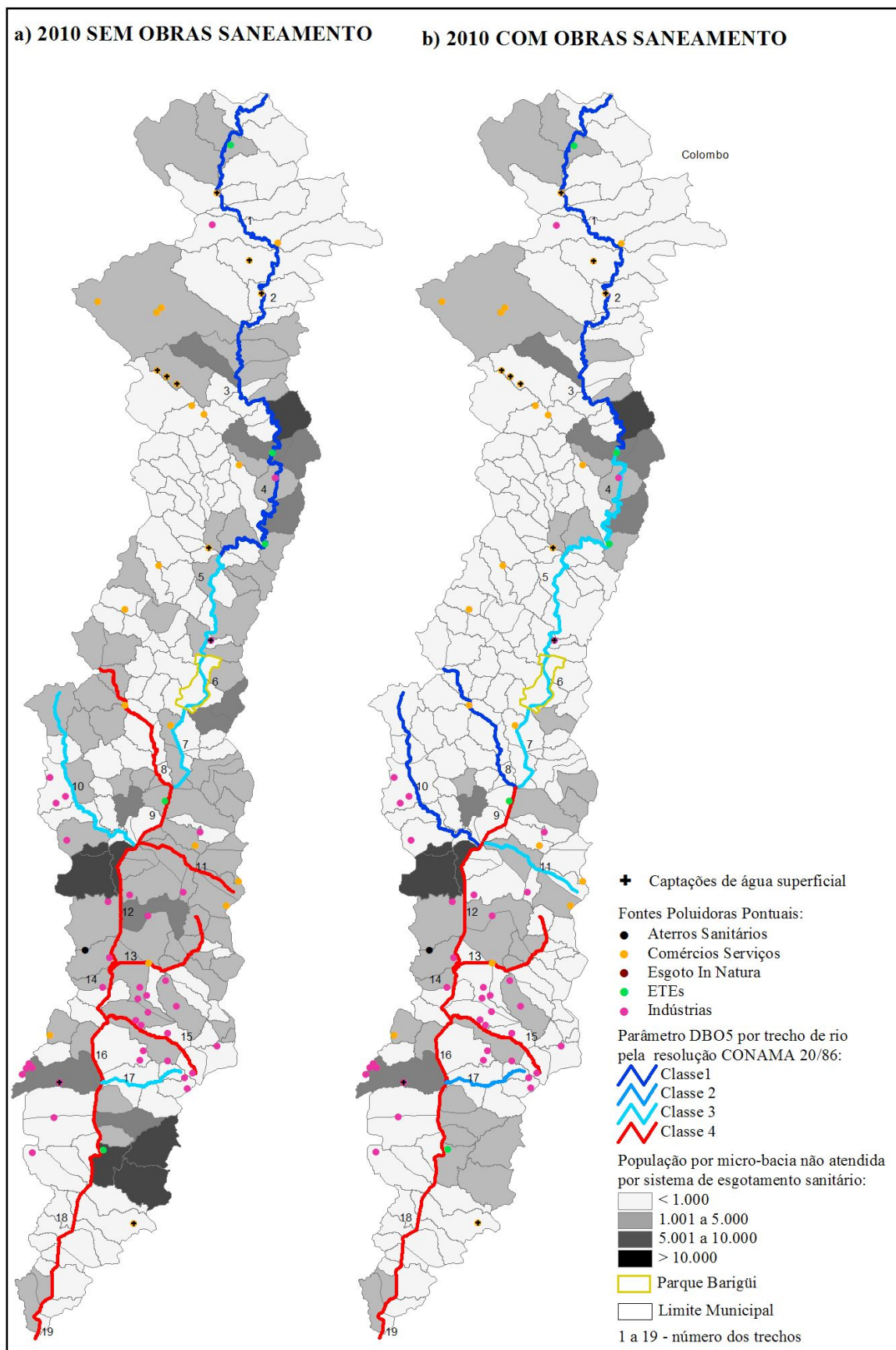
FIGURA 7.12 – CONSULTA DOS VALORES DE DBO₅



Outra função importante da análise em uma aplicação espaço-temporal em SIG é simular situações futuras e realidades alternativas. O exemplo apresentado na Figura 7.13 mostra a simulação da qualidade da água para o ano de 2010, considerando o aumento populacional previsto no Projeto Barigüi. O cenário da Figura 7.13a mostra como ficará a qualidade da água, com relação ao parâmetro DBO5, se não forem realizadas as obras de saneamento previstas. A Figura 7.13b apresenta a provável situação, caso as obras sejam realizadas. Comparando-se os mapas observa-se que a realização dessas obras é de fundamental importância para a qualidade da água na bacia.

Os requisitos relativos à apresentação dos dados já foram demonstrados através dos exemplos anteriores. Através do modelo proposto é possível a realização de consultas e apresentação dos dados através de tabelas, conforme apresentado, por exemplo, na Figura 7.4. Também é possível a geração de mapas estáticos, conforme o exemplo apresentado pela Figura 7.6. Segundo LANGRAN (1992) a geração de uma série temporal de mapas pode ser usada para mostrar o desenvolvimento de processos e a evolução passada e futura de uma determinada região ou fenômeno. Desta forma foi gerada uma série de mapas temporais de todos os eventos tratados neste trabalho, passados ou futuros entre 1996 e 2020. Estes mapas são apresentados nas Figuras 7.13 a 7.26.

FIGURA 7.13 – SIMULAÇÃO DE REALIDADES ALTERNATIVAS PARA O ANO DE 2010



FONTE DOS DADOS: SUDERHSA (1999 / 2004) / IPPUC (2003) / Projeto Barigüi (2004)

FIGURA 7.14- MAPA DO EVENTO 1

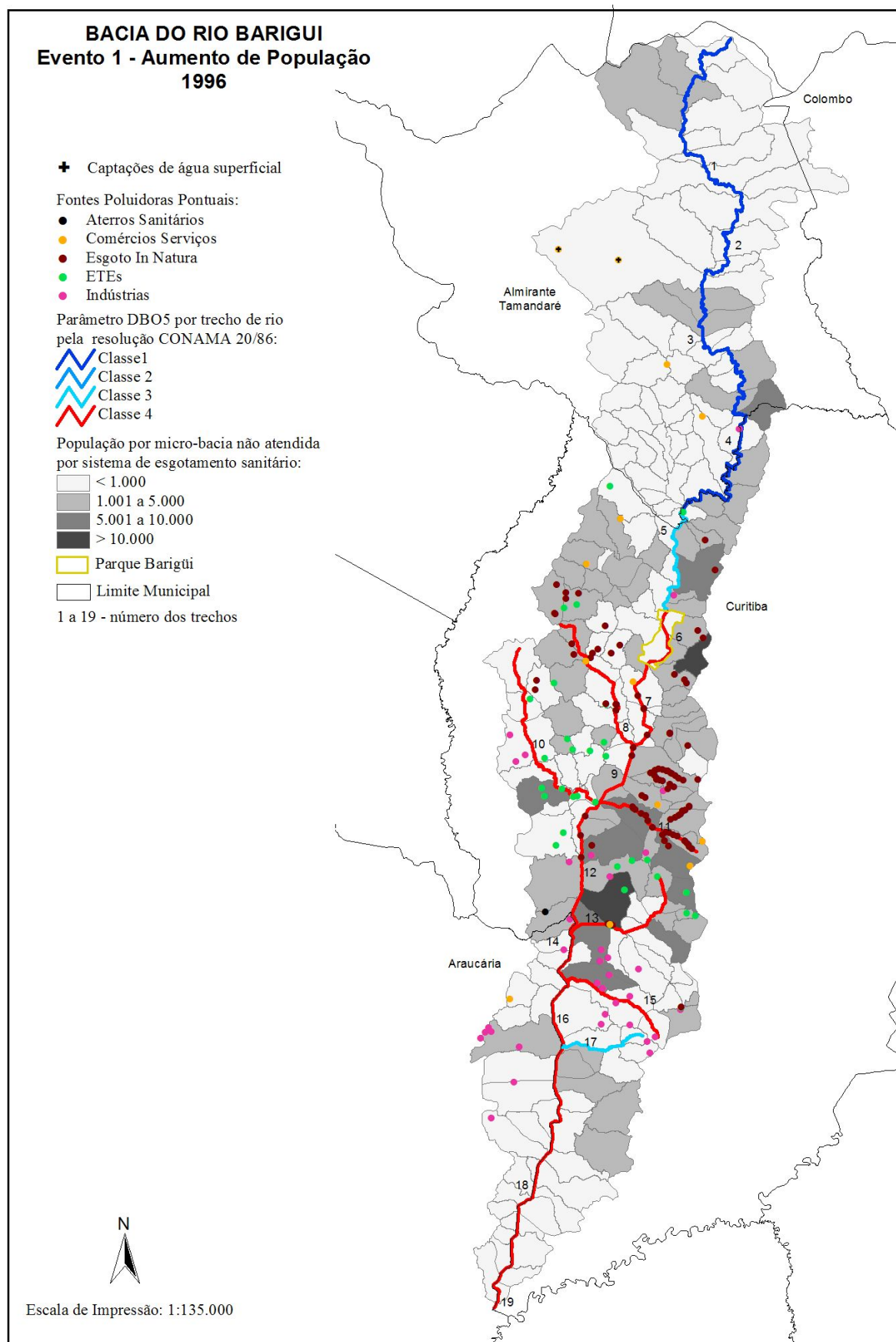
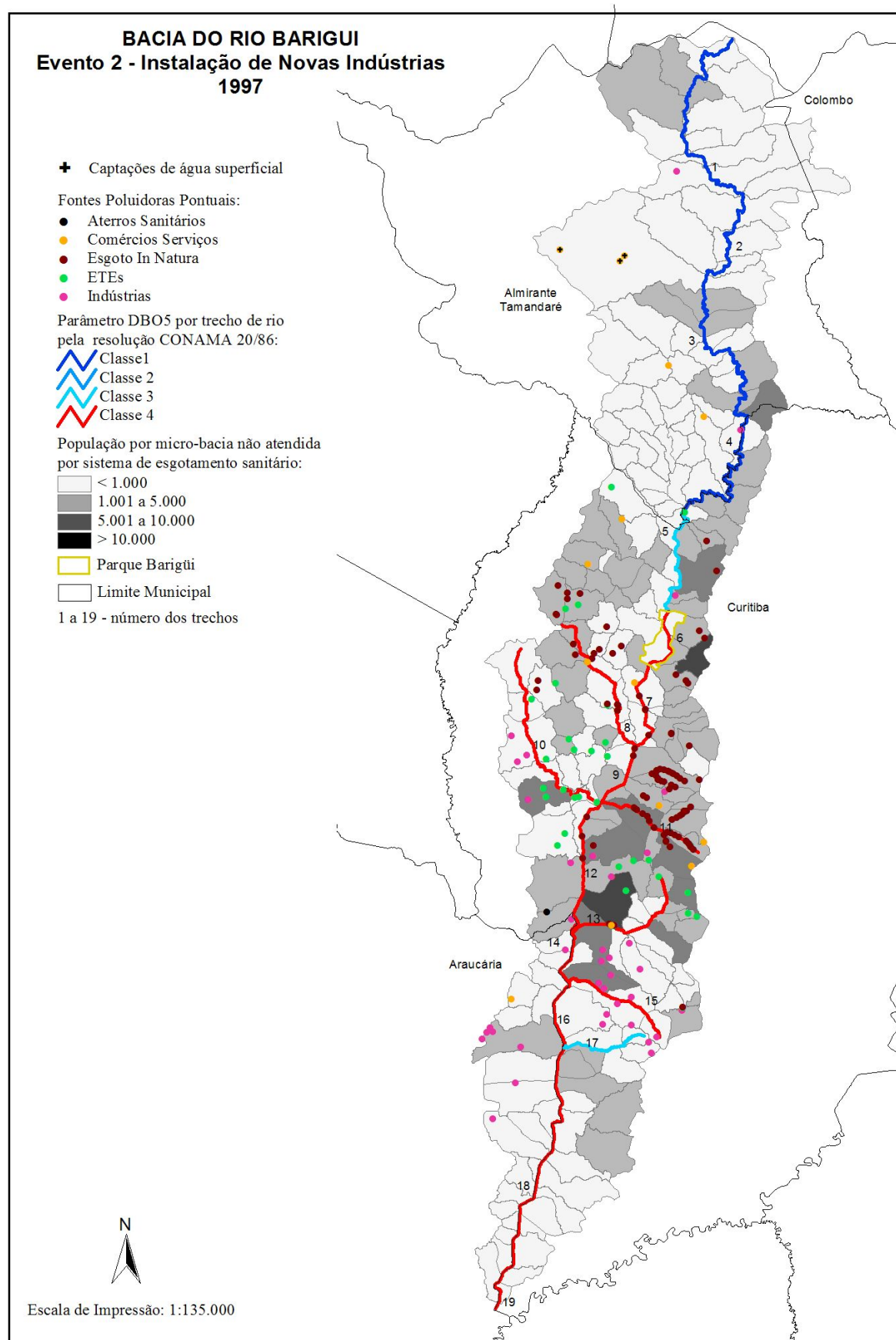
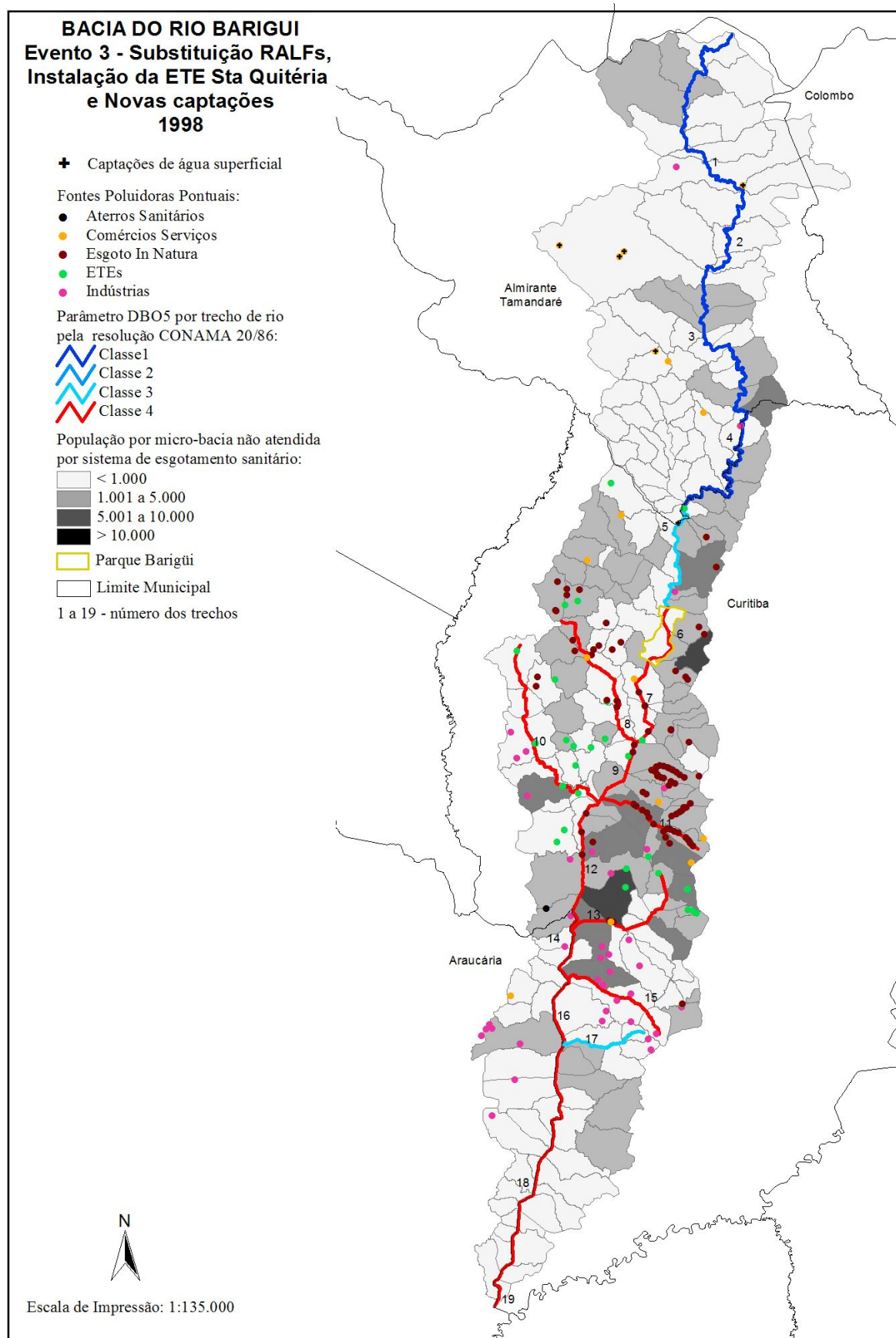


FIGURA 7.15– MAPA DO EVENTO 2



FONTE DOS DADOS: SUDERHSA (1999 / 2004) / IPPUC (2003) / Projeto Barigüi (2004)

FIGURA 7.16 - MAPA DO EVENTO 3



FONTE DOS DADOS: SUDERHSA (1999 / 2004) / IPPUC (2003) / Projeto Barigüi (2004)

FIGURA 7.17- MAPA DO EVENTO 4

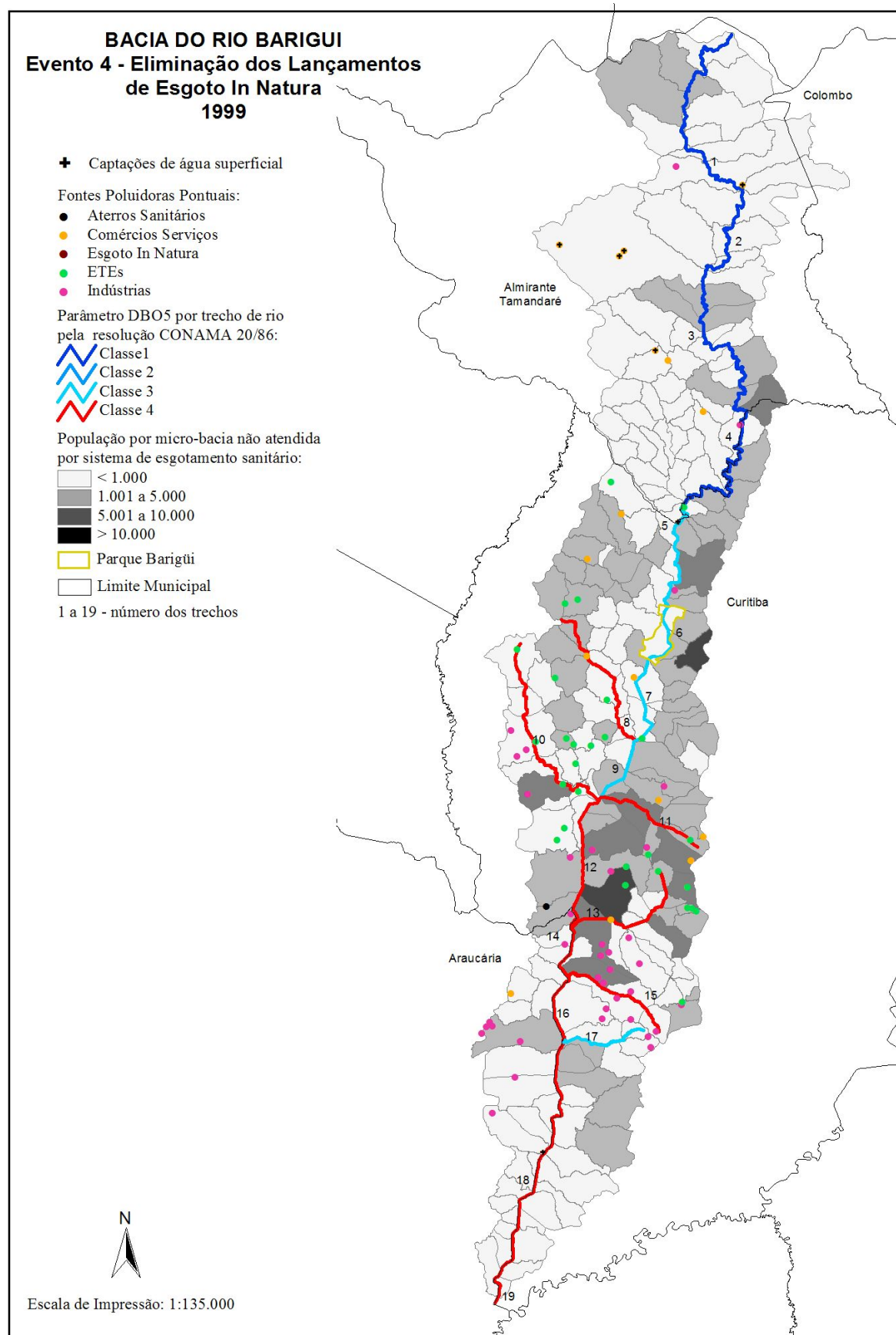
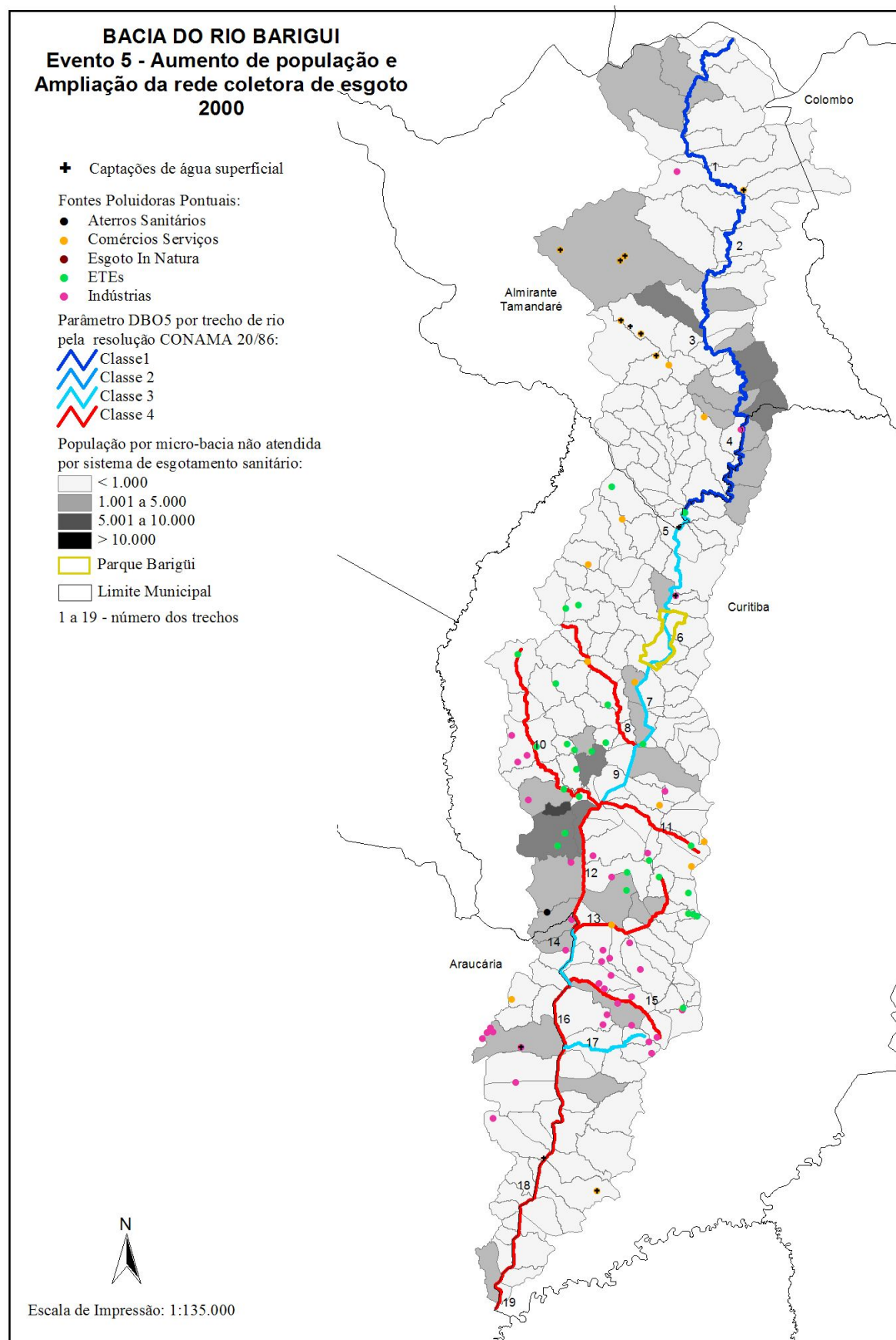
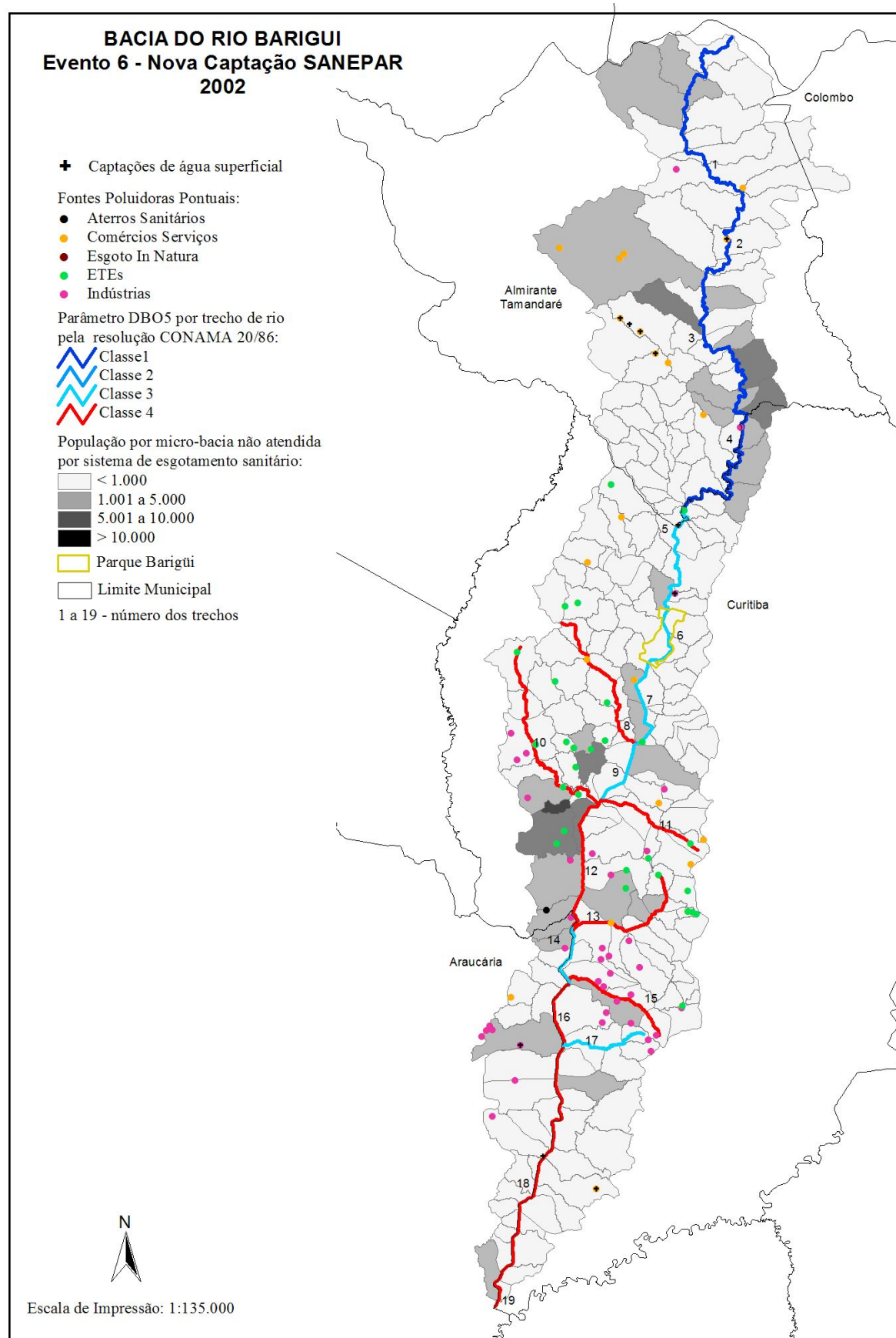


FIGURA 7.18- MAPA DO EVENTO 5



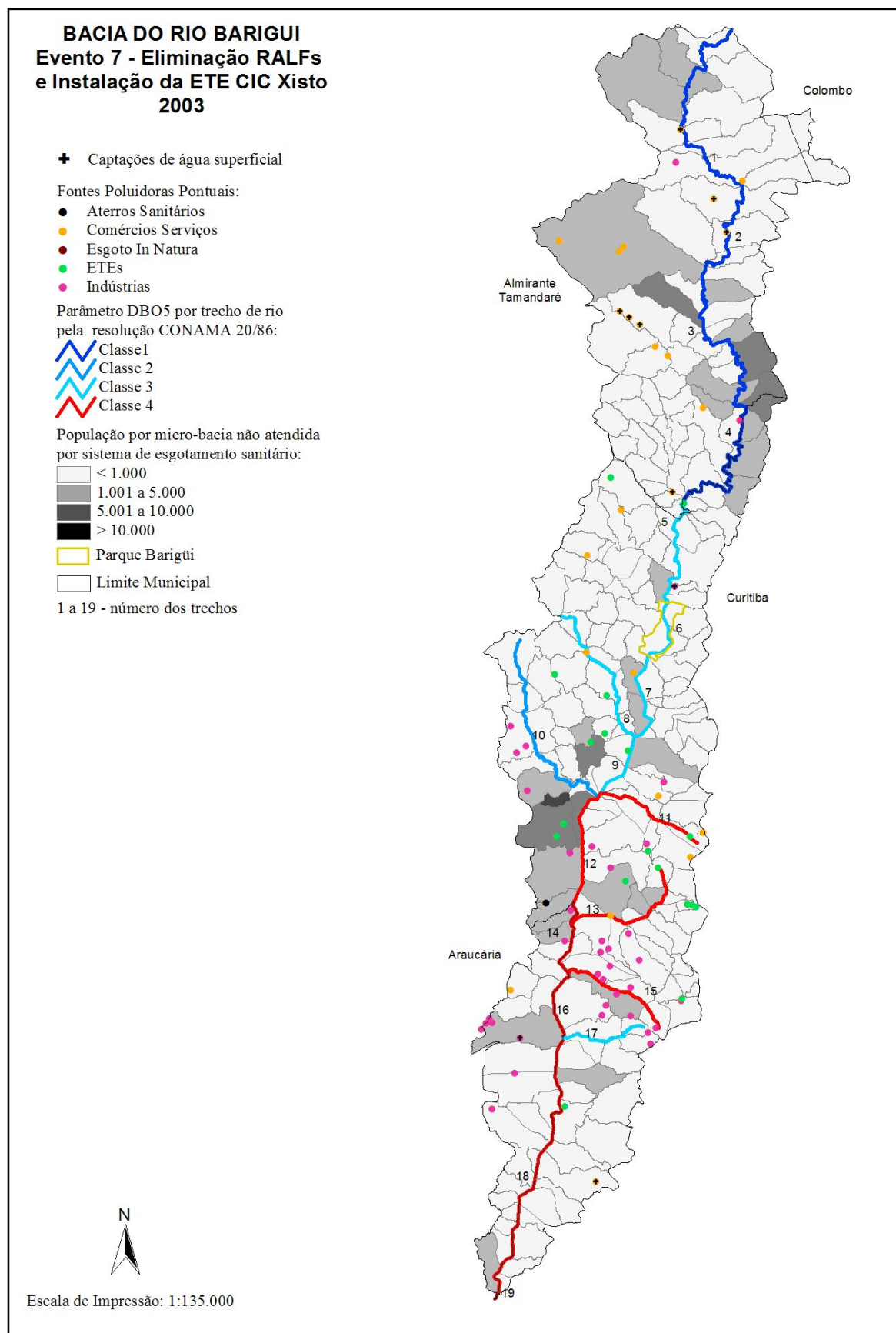
FONTE DOS DADOS: SUDERHSA (1999 / 2004) / IPPUC (2003) / Projeto Barigüi (2004)

FIGURA 7.19- MAPA DO EVENTO 6



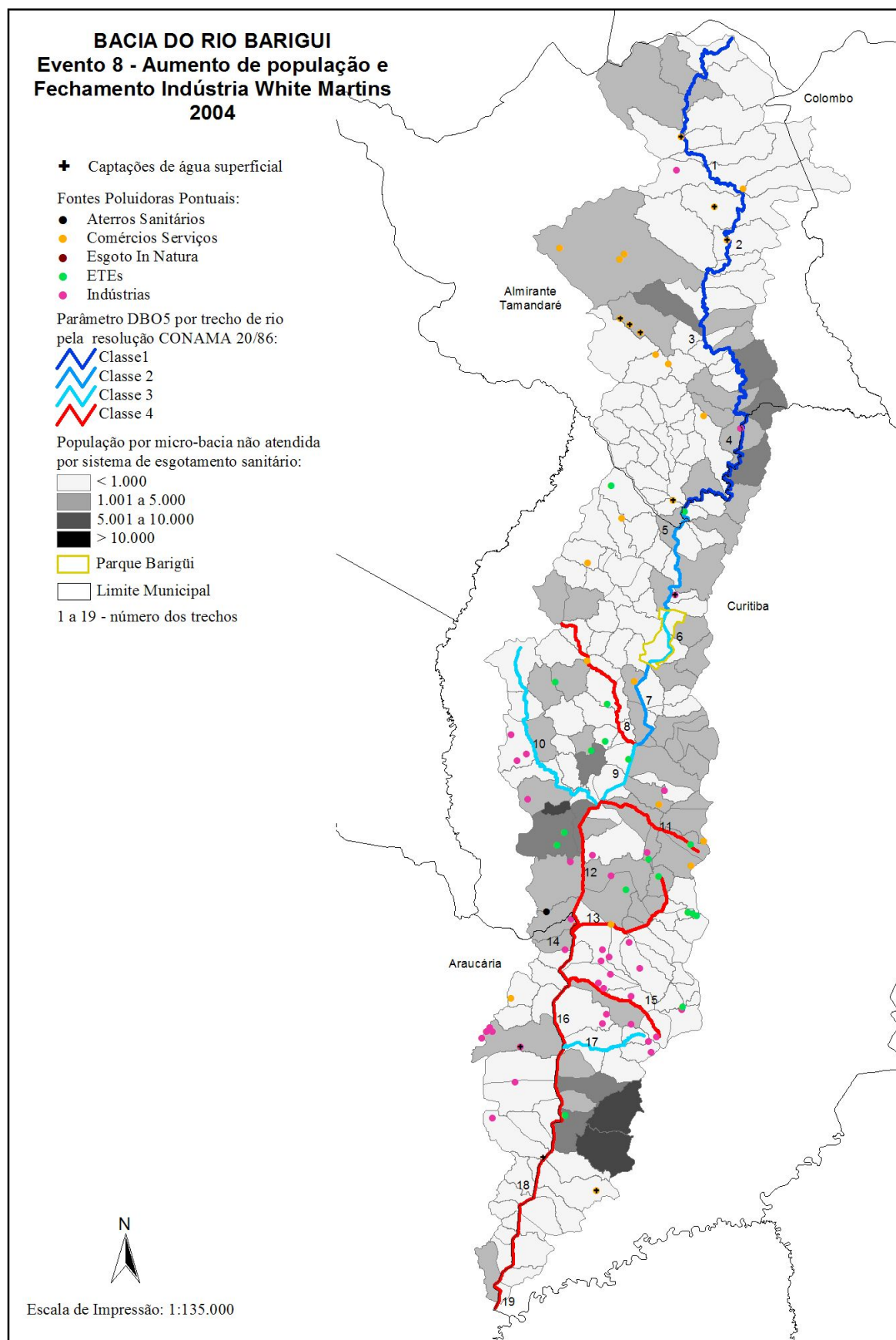
FONTE DOS DADOS: SUDERHSA (1999 / 2004) / IPPUC (2003) / Projeto Barigüi (2004)

FIGURA 7.20- MAPA DO EVENTO 7



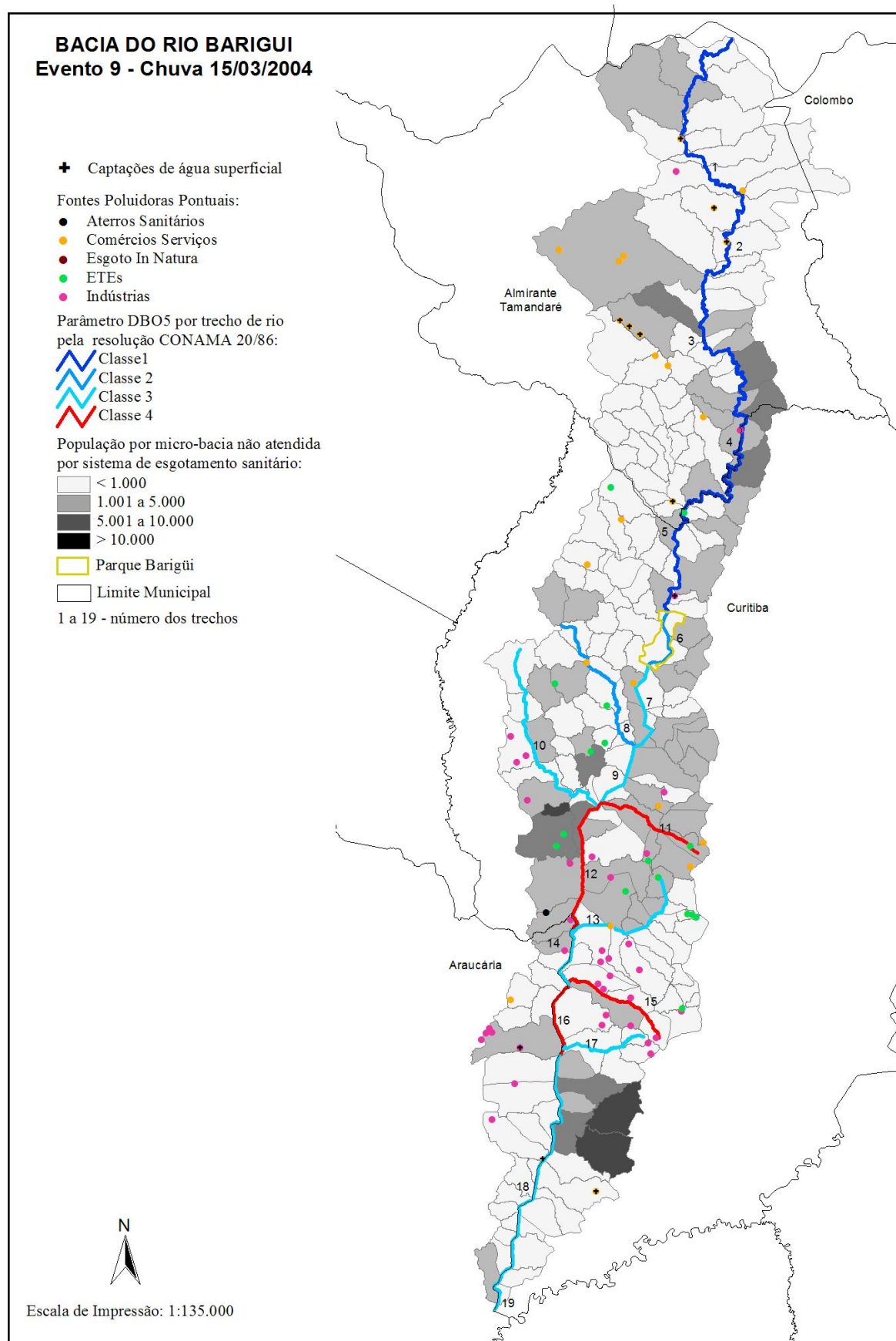
FONTE DOS DADOS: SUDERHSA (1999 / 2004) / IPPUC (2003) / Projeto Barigüi (2004)

FIGURA 7.21- MAPA DO EVENTO 8



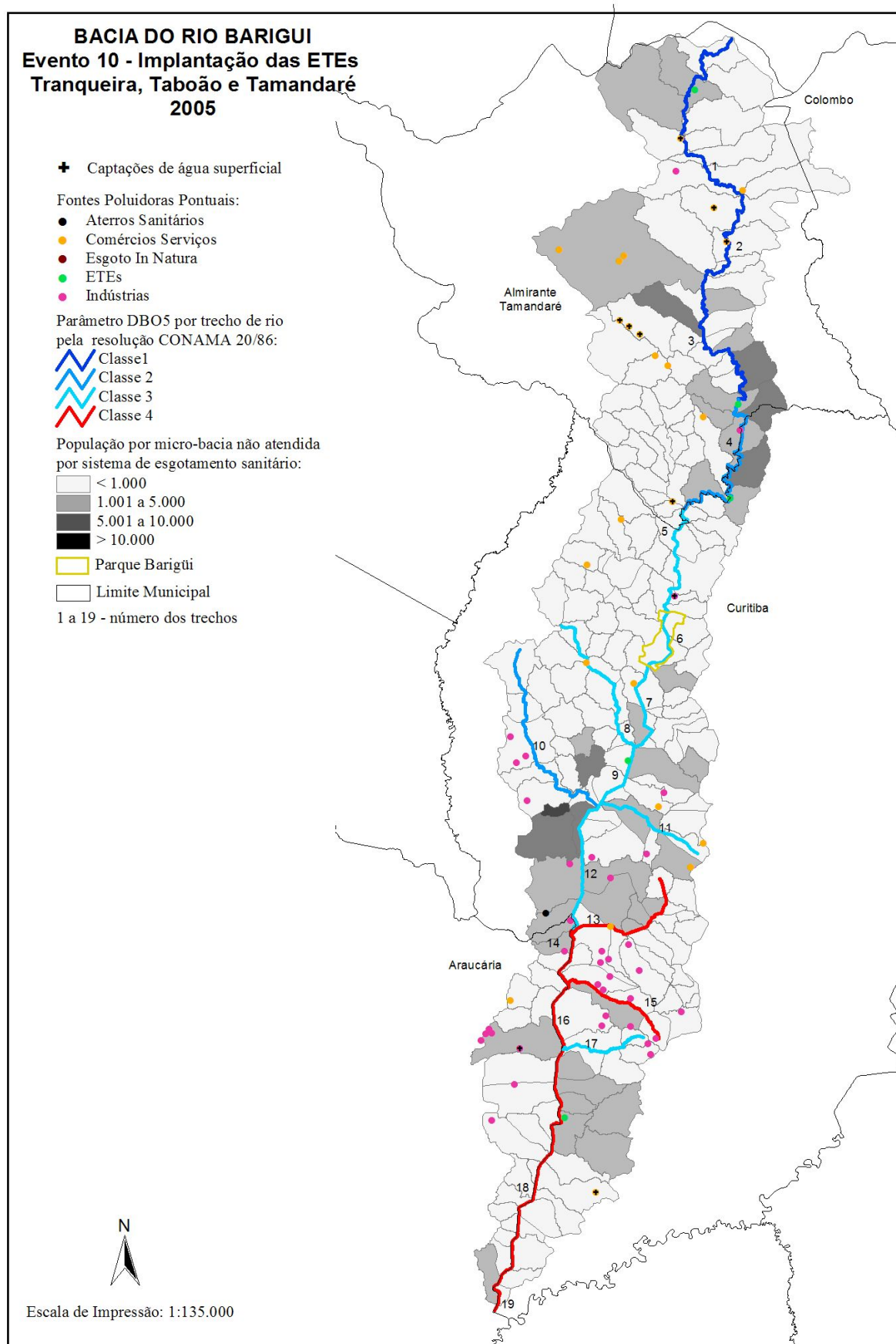
FONTE DOS DADOS: SUDEHSA (1999 / 2004) / IPPUC (2003) / Projeto Barigüi (2004)

FIGURA 7.22- MAPA DO EVENTO 9



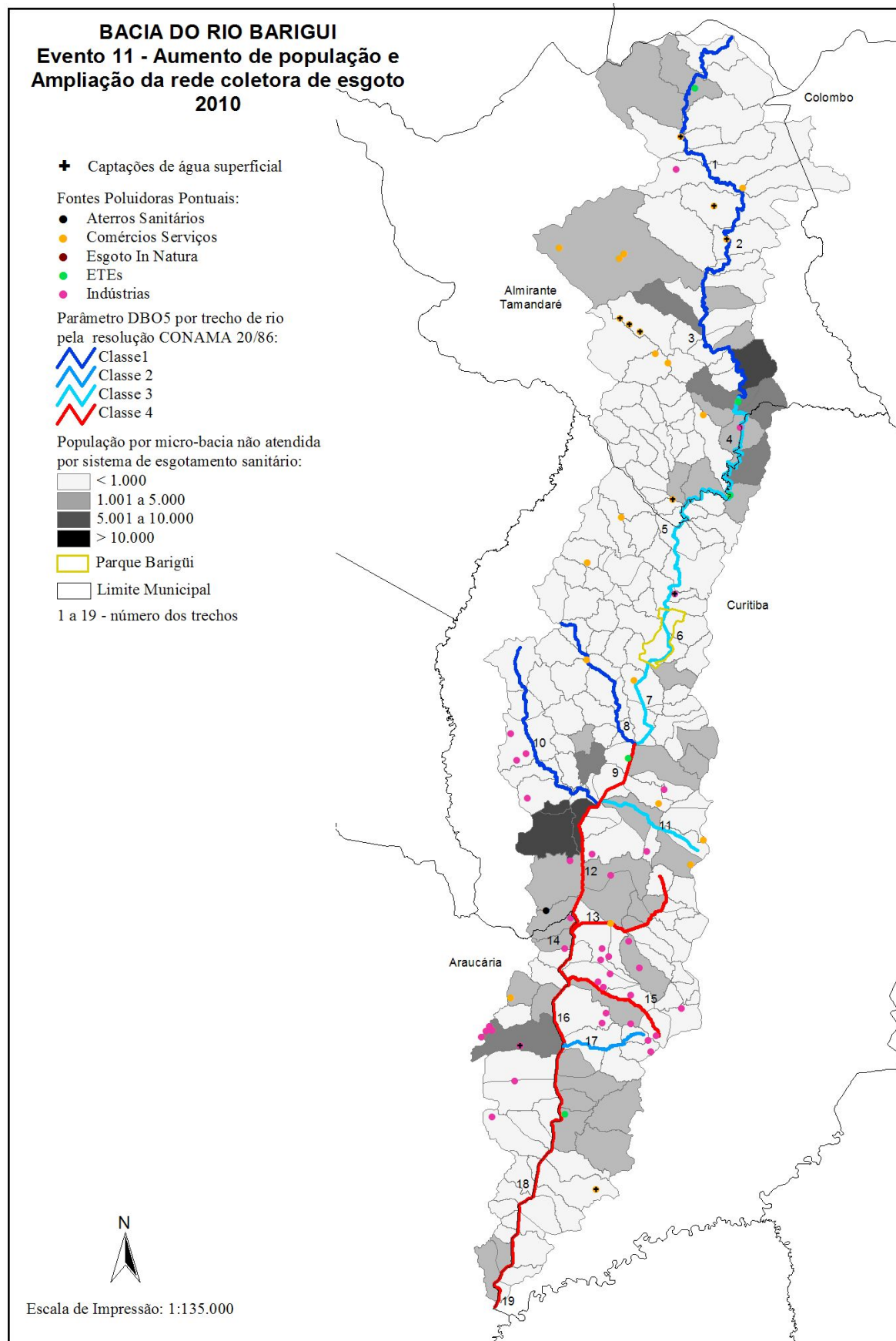
FONTE DOS DADOS: SUDERHSA (1999 / 2004) / IPPUC (2003) / Projeto Barigüi (2004)

FIGURA 7.23- MAPA DO EVENTO 10



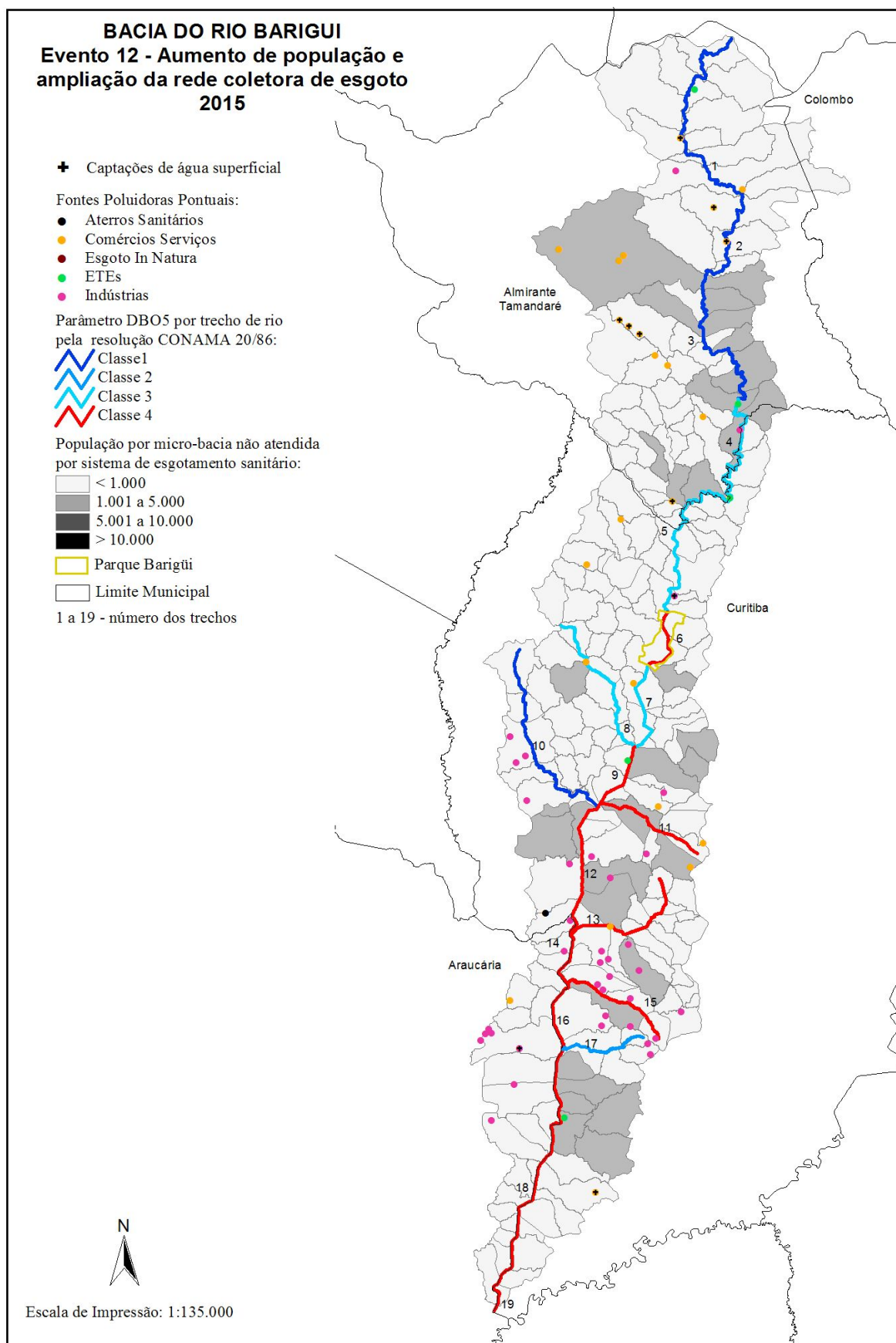
FONTE DOS DADOS: SUDERHSA (1999 / 2004) / IPPUC (2003) / Projeto Barigüi (2004)

FIGURA 7.24- MAPA DO EVENTO 11



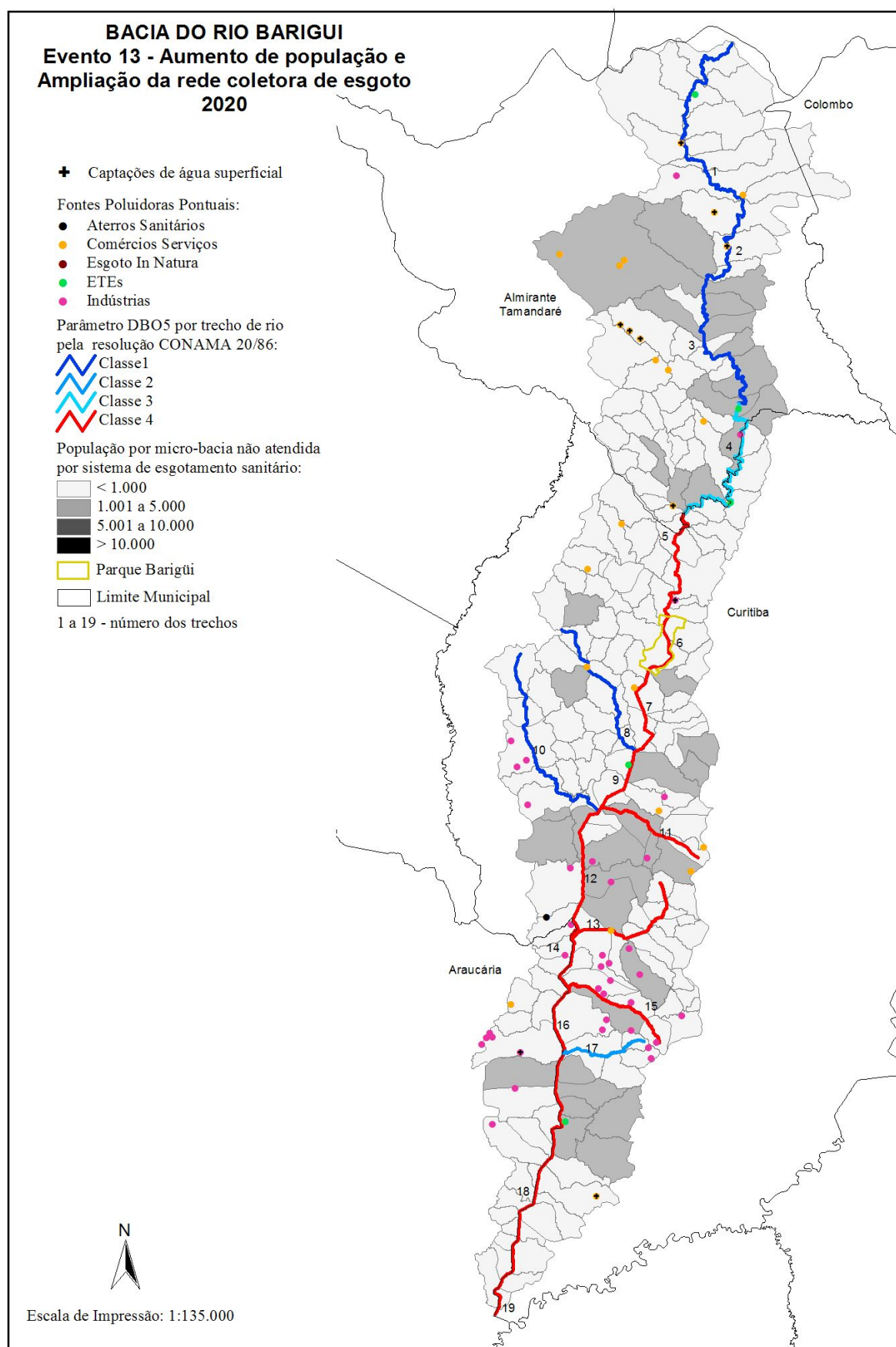
FONTE DOS DADOS: SUDERHSA (1999 / 2004) / IPPUC (2003) / Projeto Barigüi (2004)

FIGURA 7.25- MAPA DO EVENTO 12



FONTE DOS DADOS: SUDERHSA (1999 / 2004) / IPPUC (2003) / Projeto Barigüi (2004)

FIGURA 7.26- MAPA DO EVENTO 13



8. CONCLUSÕES

Com este trabalho teve-se por objetivo o desenvolvimento de um modelo de dados espaço-temporal em SIG para análise da qualidade da água em uma bacia hidrográfica. Para alcançar esse objetivo, aplicou-se a metodologia de modelagem e projeto de banco de dados da análise de sistemas, que busca conhecer um problema para desenvolver ferramentas para o auxílio na tomada de decisões. As etapas desenvolvidas durante a realização do trabalho foram:

- a definição dos requisitos do modelo, a partir da contextualização do problema da qualidade da água em relação a aplicações espaço-temporais em SIG;
- a construção do modelo espaço-temporal utilizando-se das técnicas do modelo Entidade-Relacionamento, e;
- a implementação do modelo proposto no SIG para realização de consultas e análises espaço-temporais.

Para representar a evolução da qualidade da água no espaço e no tempo propôs-se uma adaptação do modelo “Dados Espaço-temporais baseado em Eventos – ESTDM”, inicialmente proposto por PEUQUET e DUAN (1995). Este modelo é baseado em eventos, utiliza o tempo como base para organizar os dados espaciais e permite registrar o momento e o local das mudanças ocorridas.

Foi utilizado um modelo matemático de qualidade da água para simular a influência das fontes poluidoras na qualidade da água (atual, passada e futura) em uma bacia hidrográfica. O modelo utilizado foi o QUAL2E desenvolvido pela EPA-USA (Environmental Protection Agency dos Estados Unidos da América).

A implementação do modelo foi realizada para a bacia hidrográfica do rio Barigüi, localizado na Região Metropolitana de Curitiba, no Estado do Paraná, Brasil. Para a composição de uma base de dados para demonstrar a eficiência do modelo espaço-temporal em simular eventos passados, presentes e futuros foram utilizadas informações de indústrias, estabelecimentos comerciais e de serviços, estações de tratamento de esgoto, aterros sanitários, pontos de lançamentos de esgoto *in natura*, e dados populacionais oriundos de vários projetos. A base composta abrangeu dados de 1996 a 2020, e foi implementada utilizando-se o ACCESS e o SIG ArcView 3.2.

A metodologia empregada se mostrou adequada ao desenvolvimento do trabalho e pode ser aplicada para outras bacias hidrográficas pois as peculiaridades das diferentes bacias não alteram a modelagem do sistema. As diferenças entre as bacias são tratadas no modelo de dados como atributos das entidades, dessa forma as decisões não se alteram.

O uso do modelo QUAL2E supriu a necessidade do trabalho que era avaliar o impacto causado pelas atividades humanas na qualidade da água. O modelo simula fontes de poluição pontuais e difusas, retiradas de água e diferentes vazões por trecho de rio. O modelo apresenta uma limitação de 1000 mg/l de DBO₅ para cada elemento computacional, o que prejudicou o resultado da simulação nos trechos mais poluídos do rio.

É importante ressaltar também que os dados de calibração utilizados para o modelo QUAL2E foram oriundos do Projeto Barigüi e que esses dados não passaram por um processo de verificação, o que pode comprometer os resultados de qualidade da água apresentados para a Bacia do Barigüi.

O ArcView foi utilizado na preparação da base de dados e na implementação do modelo espaço-temporal para a realização das consultas e análises pré-definidas, e se mostrou adequado às duas tarefas. Esse programa suporta os modelos de representação de dados espaço-temporais utilizados neste trabalho, estruturas vetoriais

e manipulação de tabelas e consultas criadas no banco de dados. Disponibiliza uma série de facilidades para a criação de consultas e mapas temáticos e possibilita análises comparativas entre temas geográficos.

A preparação dos dados foi uma fase bastante dispendiosa, durante a qual constatou-se inconsistências nos dados disponíveis, tanto na base cartográfica quanto nos dados tabulares. A maioria das inconsistências verificadas diz respeito à localização e características das entidades geográficas, e são decorrentes da precisão da base cartográfica utilizada e dos métodos de obtenção dos dados. A base cartográfica utilizada por este trabalho está na escala 1:10.000 e a maioria dos dados oriundos de outros projetos foram preparados em uma base na escala 1:50.000. A identificação dessas inconsistências só foi possível devido à utilização desses dados em um Sistema de Informações Geográficas, com uma base cartográfica em uma escala adequada às análises consideradas essenciais à solução do problema proposto, sendo este a qualidade da água na bacia do Rio Barigüi.

Durante o desenvolvimento do trabalho foi possível realizar a correção de muitos erros significativos, dentre eles, a localização correta de indústrias, estabelecimentos comerciais e estações de tratamento de esgoto. Outra correção importante realizada durante este trabalho foi a correta localização das nascentes do rio Barigüi na base cartográfica da SUDERHSA, que é a base de dados oficial de recursos hídricos do Estado do Paraná.

Também se verificou a inadequação das informações para uma aplicação espaço-temporal. Embora tenha sido possível obter uma grande quantidade de dados cadastrais, as informações relativas à dimensão temporal (datas) são poucas e insuficientes para análises temporais. Isso reflete a não preocupação das organizações em manter um registro histórico das informações, dando ênfase apenas à informação atual.

Através do modelo de dados proposto é possível armazenar o resultado de várias simulações para uma bacia hidrográfica, ligando cada simulação a um evento específico e identificando qual o cenário existente em um momento específico. Dessa forma é possível identificar as alterações ocorridas na qualidade da água ao longo do tempo e relacioná-las tanto aos eventos que as causaram quanto às fontes geradoras da poluição. O modelo de dados suporta a existência de realidades alternativas, e permite a simulação de cenários passados e futuros e a comparação entre eles. Também é possível, através do modelo de dados comparar os valores gerados pelo modelo QUAL2E com os valores determinados em campo.

A partir do modelo implementado para a bacia do Barigüi foi possível identificar a situação atual, passada e simular a situação futura da qualidade da água na bacia, com relação ao parâmetro simulado, a DBO₅. O rio Barigüi apresenta uma situação bastante comprometedora da qualidade da água, porém a realização das análises e consultas espaço-temporais sugere que a situação em alguns trechos era pior em 1996. A maioria dos problemas existentes nesta época, e que foram atenuados, são relativos ao lançamento de esgotos domésticos na bacia, seja através de lançamentos *in natura*, ou através da utilização de estações de tratamento com baixa eficiência. Isso sugere que as obras de saneamento que vêm sendo realizadas na bacia têm grande importância na melhoria da qualidade da água, embora a situação da bacia ainda seja crítica. Através dos resultados deste trabalho, percebe-se também que a região que concentra um grande número de indústrias, a cidade industrial de Curitiba, é a que apresenta a pior situação em relação ao parâmetro DBO₅ e que as obras de saneamento quase não interferem na qualidade da água nessa região.

A comparação entre dois cenários futuros, alternativos, no caso a projeção populacional para o ano de 2010, com ou sem a realização das obras previstas pela SANEPAR, simula o impacto que o aumento da população e da inexistência ou ineficiência dos sistemas de esgotamento sanitário causam à qualidade da água. A

análise comparativa entre essas duas alternativas sugere que haverá uma queda significativa na qualidade da água em alguns trechos ou afluentes do Barigüi, caso as obras não sejam realizadas. Fica evidente nesta análise também, que a situação dos trechos abrangidos pela cidade industrial de Curitiba, continuariam apresentando valores muito acima dos níveis permitidos para este rio, independentemente da realização das obras mencionadas.

Os mapas temáticos de qualidade da água gerados pelo trabalho, para as diferentes situações nos períodos estudados, fornecem subsídios para a definição de ações a serem executadas a médio e longo prazo, a fim de melhorar a qualidade da água na bacia do Barigüi.

Os resultados deste trabalho permitiram constatar que o uso de um Sistema de Informações Geográficas para o conhecimento e avaliação dos impactos causados pelas atividades humanas na qualidade da água, em uma bacia hidrográfica, ao longo do tempo, é uma ferramenta útil para o gerenciamento dos recursos hídricos. Pois, através das facilidades do SIG, é possível a apresentação dos dados em forma de mapas e consultas que facilitam o entendimento das variáveis relacionadas à qualidade da água e sua dinâmica ao longo do tempo, fornecendo subsídios para o gerenciamento dos recursos hídricos.

Com relação à qualidade da água, é importante destacar que o presente trabalho não teve por objetivo constituir uma base definitiva de dados para a bacia do rio Barigüi. Embora tenha sido realizada a correção de uma série de inconsistências durante a fase de preparação dos dados, a finalidade do uso dos dados dessa bacia foi testar o modelo espaço-temporal proposto. Portanto, para a utilização desses dados em futuros trabalhos relativos à qualidade da água, recomenda-se que as informações sejam preparadas para corrigir possíveis inconsistências, para incluir todos os dados necessários, e para definir com maior confiabilidade os dados sobre a poluição causada por todos os agentes considerados neste trabalho, tais como, concentrações dos

poluentes nas cargas geradas pelos lançamentos industriais, comerciais, e de efluentes das ETEs e de lançamentos de esgoto *in natura*, além de valores relativos ao cálculo da poluição difusa gerada pelos eventos de chuva. Recomenda-se também que seja realizada a verificação da calibração do modelo para esta bacia.

Para a realização de trabalhos futuros, sugere-se a programação de interfaces para a geração e carga da matriz de poluição para o QUAL2E, de modo a permitir a sua execução a partir da interface do ArcView. Sugere-se também a alteração do código do programa de implementação do QUAL2E para eliminar a limitação de 1000 mg/l de DBO₅ por elemento computacional, visto que este programa é de domínio público e possui código aberto.

Com relação aos resultados do Projeto Barigüi, recomenda-se implementar o modelo proposto para os outros parâmetros estudados pelo projeto: Nitrogênio total, Fósforo Total, coliformes Fecais, Sólidos em Suspensão, Fósforo Orgânico e Nitrogênio Orgânico.

Recomenda-se também a programação de interfaces para a realização das consultas e análises espaço-temporais no ArcView, para facilitar o uso do modelo por técnicos das diversas áreas relacionadas à gestão dos recursos hídricos.

Para melhorar a apresentação dos resultados das consultas e análises espaço-temporais sugere-se o estudo e proposição de métodos de animação de mapas em SIG.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL & ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos**. 2 ed. Brasília, 2001. 328 p.

BEDÁRD, Y. Principles of Spatial Database Analysis and Design. In: LONGLEY, P.; GOODCHILD, M.; MAGUIRE, D.; RHIND, D. (eds.) **Geographical Information Systems: Principles and Technical Issues**. New York: J. Wiley & Sons. 2. ed. V. 1, 1999. p. 413-424.

BIZZONI, M. **Comparação do desempenho dos modelos QUAL2E e Mike 11 na região do Alto Iguaçu, Paraná**. Curitiba, 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

BRITISH COLUMBIA (Província). **Spatial Archive and Interchange Format: Formal Definition**, release 3.2, 1995. Disponível em: <http://srmwww.gov.bc.ca/bmgs/fmebc/histfmt.htm> Acesso em: 20 maio 2004.

BURROUGH, P.A. Environmental modeling with geographical information systems. In: FOURTH NATIONAL CONFERENCE ON GIS RESEARCH, 4., 1997, Inglaterra. KEMP, Z. **Innovations in GIS 4**. Inglaterra: Taylor & Francis, 1997. pg. 143-153.

BURROUGH, P.A. **Principles of geographical information systems**. New York: Oxford university Press. 1. ed, reimpressão com correções, 1998.

CHAPRA, S. C. **Surface water-quality modeling**. USA: McGraw-Hill, 1997.

COUCLELIS H. Space, Time, Geography. In: LONGLEY, P.; GOODCHILD, M.; MAGUIRE, D.; RHIND, D. (eds.) **Geographical Information Systems: Principles and Technical Issues**. New York: J. Wiley & Sons. 2. ed. V. 1, 1999. p. 29-38.

DATE, C. J. **Introdução a sistemas de bancos de dados**. Tradução (da 4ª edição original) de Contexto Traduções. Rio de Janeiro: Campus, 1991.

HEM, J. D. **Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water**. Washington, DC: US Geological Survey Water-Supply, 3ª ed., 1989.

HOUAISS, A. **Dicionário Houaiss da língua portuguesa**. Rio de Janeiro: Objetiva, 2001.

KELLER, ROBERT. **Análise estruturada na prática**. São Paulo: mcGrall-Hill, 2ª ed., 1999.

KORTH, H. F. e SILBERSCHATZ, A. Sistema de Banco de dados. 2ª ed; tradução Mauricio Heihachiro Galvan Abe ; revisão técnica Prof. Waldemar W. Setzer. São Paulo: MAKROBooks ed, 1995.

LANGRAN, G.; CHRISMAN, N.R. A framework for temporal geographic information. **Cartographica**, 25. 1988.

LANGRAN, G. **Time in Geographic Information System**. London: Taylor & Francis. 1992. 189 p.

LANGRAN, G. **One GIS, many realities**. GIS 93. Vancouver: 1993.

LESTER, M. **Tracking the temporal polygon**: a conceptual model of multidimensional time for geographic information system. Presented at Temporal Workshop. Maine: 1990.

LIMA, E. B. N. R **Modelação Integrada para gestão da qualidade da água na bacia do rio Cuiabá**. Rio de Janeiro, 2001. 184 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

LINFIELD, C. B. e BARNWEL JR, T.O. **The enhanced stream water quality model qual2e and qual2e-uncas: documentation and user manual**. Giorgia: U.S. Environmental Protection Agency. 1987.

LONGLEY, P.A.; GOODCHLD, M.F.; MAGUIRE D.J.; RHIND D.W. **Geographical Information System: Principles and Technical Issues**. New York: J. Wiley & Sons. 2^a. ed. V. 1, 1999. p. 23-27.

MENESES FILHO, A. de S.; TUCCI, C. E. M. Impacto da urbanização na produção anual de cargas poluentes, com incerteza. In: SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LINGUA OFICIAL PORTUGUESA. 6,

MOORE, I.D., TURNER, A.K., WILSON, J.P., JENSON, S.K. e BAND, L. GIS and land surface-subsurface process modeling. In: GOODCHILD, M.F., PARKS B.O., STEYAERT, L.T. (eds), **Environmental Modeling with GIS**. Nova Iorque: Oxford university, 1993. p. 196-203.

PEUQUET, D.J.; DUAN, N. An event-based spatio-temporal data model (ESTDM) for temporal analysis of geographic data. **International Journal of Geographic Information System** 9: 2-24. 1995.

PEUQUET, D.J. Time in GIS and Geographical Databases. In: LONGLEY, P.; GOODCHILD, M.; MAGUIRE, D.; RHIND, D. (eds.) **Geographical Information Systems: Principles and Technical Issues**. New York: J. Wiley & Sons. 2. ed. V. 2, 1999. p.91-103.

PORTO, M. F. A. Aspectos qualitativos do escoamento superficial em áreas urbanas. In **Tucci, C. E., M. Porto, R. L. E Barros, M. T. (ed). Drenagem urbana**. Porto Alegre: ABRH - editora da universidade UFRGS, 1995.

PRICE, R.; SRINIVASAN, B.; RAMAMOHANARAO, K. Extending the Unified Modeling Language to Support Spatiotemporal Applications. **Asia Technology of object Oriented Languages and Systems**. 1999. p. 163-174.

PROJETO BARIGUI., **Avaliação do custo-benefício de medidas de controle de cheias e despoluição urbana: estudo de caso da bacia do Rio Barigüi**. Curitiba: UFPR-DHS, 2003. 154 p. Relatório 1 – parcial.

RAPER, J. **Multidimensional Geographic Information Science**. London: Taylor & Francis, 2000.

RAPER, J.; LIVINGSTONE, D. **Spatio-Temporal Interpolation In Four Dimensional Coastal Process Models**. 1995. Disponível em: <<http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTAFECDDROM/sfpapers/RAPERjonathan/RAPERliv.html>> Acesso em: 10 jul. 2003.

RIISE, A. **The Storage, Management and Use of Spatio-temporal Data in the DYNAMP Project**. Oslo: White paper, 1999. Disponível em: <<http://www.sintef.no/static/am/git/downloads/timegis.pdf>> Acesso em: 10 jul. 2003.

ROMANOWICZ, R.; BEVEN K.; MOORE, R. GIS and Distributed Hydrological Models. In: MATHER, P.M. **Geographical Information Handling: Research and Applications**. Chichester: J. Wiley & Sons, 1994, p.197-205.

SAFE SOFTWARE INC. **Spatial Archive and Interchange Format (SAIF) Home Page**. Disponível em: <<http://s2k-p.cs.berkeley.edu:8000/sequoia/schema/html/saif/saifHome.html>> Acesso em: 14 jul. 2003.

SANTOS, I., HEINZ, D. F., SUGAI, M. R. V. B., BUBA, H., KISHI, R.T., MARONE, E., LAUTERT, L.H. **Hidrometria aplicada**. Curitiba: LACTEC, 2001. Cap. 1 e 2.

SCHULLER, T. **Controlling urban runoff: a practical manual for planning and designing urban BMPs metropolitan**. Washington Council pf Governments, 1987.

SILVA, M. H. N. de L. e. **Análise e modelagem numérica da qualidade da água em rios**. Curitiba, 1998. 212 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

SUDERHSA. **Cadastro de Usos e Usuários de Recursos Hídricos da Bacia do Alto Iguaçu**. CD - Relatório final, 1999.

TUCCI, C. E. M.. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: Universidade UFRGS/ABRH, 1998.

TUNDISI, J. G. **Água no século XXI: Enfrentando a escassez**. São Carlos: RiMa, 2003. 248p.

TEIXEIRA, A. L. de A.; CHRISTOFOLETTI, A. **Sistema de informação geográfica – dicionário ilustrado**. São Paulo: Hucited ed., 1997.

VASCONCELOS NETO, A. F. de. **Calibração do modelo QUAL2E no rio Barigü/PR com vistas à gestão de bacias urbanas**. Curitiba, 2003. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

WETHERBE, J. C. **GIS: Análise de sistemas: para sistemas de informação por computador**; tradução de Helena lindenbergh Lemos. #. Ed. Rio de Janeiro: Campus. 1987

WORBOYS, M. F. **GIS: A Computing Perspective**. London: Taylor & Francis. 1995.

YUAN, M. Representing Complex Geographic phenomena in GIS. **Cartography and Geographic Information Science**. V. 28. No 2, 2001. p. 83-96.